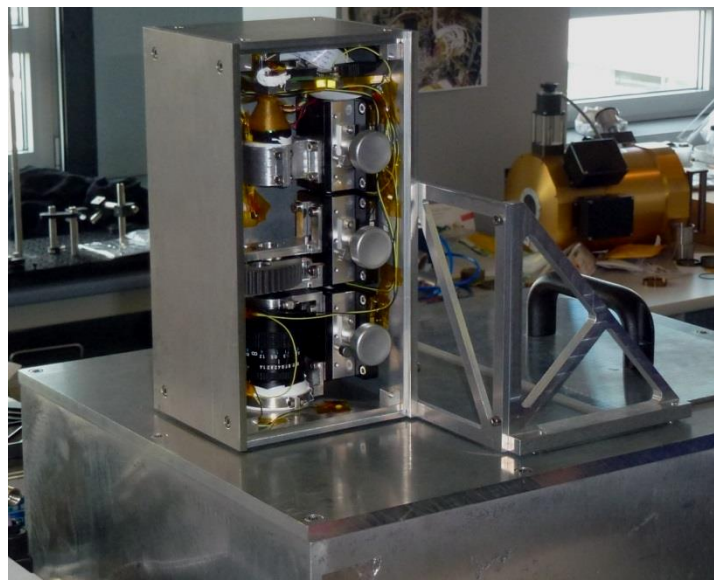


Masterarbeit

Design, Fertigung und Test eines Entwicklungsmodells zur Untersuchung des optischen Designs des Venus Emissivity Mappers (VEM) unter Verwendung des Raspberry Pi



vorgelegt von: Dennis Wendler
Matrikelnummer: 315429
Studienrichtung: Luft- und Raumfahrttechnik
Abgabedatum: 03.06.2015



Technische Universität Berlin
Institut für Luft- und Raumfahrttechnik
Fachgebiet Raumfahrttechnik
Betreuer: Prof. Dr. Klaus Briß



Dt. Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Planetenforschung
Leitungsgruppe PF
Betreuer: Dr. Jörn Helbert

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Entlehnungen aus anderen Arbeiten sind an den betreffenden Stellen als solche kenntlich gemacht.

Berlin, 03.06.2015

Unterschrift

Vereinbarung zur Einräumung von Nutzungsrechten

Die Technische Universität Berlin, vertreten durch das Fachgebiet Raumfahrttechnik, kann die Ergebnisse der vorliegenden Abschlussarbeit in Lehre und Forschung weiterverwerten. Sie erhält das einfache (nicht ausschließliche) Nutzungsrecht im Sinne des § 31 Abs. 2 Urheberrechtsgesetz (Urhg). Dieses Nutzungsrecht ist zeitlich unbefristet und umfasst Festlegungen jeglicher Art (z.B. Dokumentationen, Präsentationsunterlagen, Animationen, Fotos, Videos, Geräte, Baugruppen, Verfahren, Konstruktionen, Zeichnungen, Software einschließlich Quellcode, u.ä.m.).

Eine eventuelle wirtschaftliche Verwertung seitens der Universität erfolgt nur mit Zustimmung der Verfasserin/des Verfassers der Abschlussarbeit unter deren/dessen angemessener Beteiligung am Ertrag.

Berlin, 03.06.2015

Unterschrift

Professor Dr.-Ing. Klaus Briß
Leiter Fachgebiet Raumfahrttechnik

Abstract

Nowadays, through remote sensing from space, scientists try to learn more about the evolution of Venus, a planet dominated by high pressure and heat. One of the challenges of remote sensing at Venus originates from its thick atmosphere, which prevents the observation of the planetary surface in the visible spectrum. However, missions like Venus Express provided evidence that there are atmospheric windows in the near infrared spectrum of Venus, which allow the observation of the surface thermal emissions and therefore offer the possibility to analyze the surface composition. To use these atmospheric windows more efficiently, the decision has been made to develop a new infrared camera, the Venus Emissivity Mapper VEM, a further development of the VIRTIS instrument.

Deriving from this decision, the presented master thesis will create a development model of the infrared camera based on the optic concept of VEM. To verify the optic concept, emissivity measurements with Venus analog samples shall be conducted at the Planetary Emissivity Laboratory of the German Aerospace Center. The samples, consisting of two adjacent materials, one blackbody and one less emitting material, will be observed with the camera in different wavelengths in the near infrared spectrum. By comparing the received signals of both materials, a statement about the ratio of their emissivity can be made. Since most of the camera components, besides the optics, are already space proven, the detector and electronics will be replaced by COTS components, in this case Raspberry Pi products. Additionally, the suitability of the COTS components for scientific applications as well as their possible use as a nanosatellite controller shall be evaluated through vacuum tests. The required steps for this development, starting from the design of the model, proceeding with the search of suitable optic components, ending with the assembly, test phase and evaluation, are described in more detail in this thesis.

By evaluation of the taken camera pictures and detection of different emissivity values the optic concept of VEM has been verified. Furthermore, the capabilities of the Raspberry Pi as a possible electronic for scientific instruments could be determined and its suitability for fine vacuum environments was proven. To make a final statement about the use of the Raspberry Pi as a nanosatellite controller, additional qualification tests should be conducted.

Kurzzusammenfassung

Durch eine Fernerkundung der Venus vom Weltraum aus wird heutzutage versucht, mehr über die Hintergründe der Entwicklung dieses von hohem Druck und Hitze geprägten Planeten in Erfahrung zu bringen. Die Schwierigkeit bei der Fernerkundung der Venus liegt vor allem in der dichten Atmosphäre des Planeten, welche eine Beobachtung der Planetenoberfläche im sichtbaren Bereich verhindert. Missionen wie Venus Express lieferten jedoch die Erkenntnis, dass die Venus im nahen Infrarot atmosphärische Fenster besitzt, die die thermische Emission der Oberfläche passieren und somit eine Analyse der Oberflächenzusammensetzung zulassen. Um diese atmosphärischen Fenster zukünftig zu nutzen, wurde der Beschluss zur Entwicklung einer neuen Infrarotkamera gefasst, dem Venus Emissivity Mapper VEM, die eine Weiterentwicklung von VIRTIS darstellt.

Durch die vorliegende Masterarbeit soll nun das Entwicklungsmodell dieser Infrarotkamera aufgebaut und zur Verifikation des Optikkonzepts von VEM am Planetary Emissivity Laboratory des DLR getestet werden. Zu diesem Zweck werden mit der Kamera Emissivitätsmessungen von Venusanalogproben in verschiedenen Spektralbändern des nahen Infrarot durchgeführt. Dabei werden die Proben so präpariert, dass von jeweils zwei nebeneinander befindlichen Materialien, einem Schwarzkörper und einem geringer emittierenden Material, ein Bild aufgenommen wird, aus dem dann, über einen Vergleich des empfangenen Signals, eine Aussage über das Verhältnis der Emissivitäten beider Materialien getroffen werden kann. Sowohl für die Elektronik als auch für den Detektor des Entwicklungsmodells sollen dabei COTS-Komponenten genutzt werden, in diesem Fall Raspberry Pi Produkte. Diese sollen zusätzlich auf ihre Eignung für wissenschaftliche Untersuchungen und als mögliche Nanosatellitenkontroller hin überprüft werden. Die dafür notwendigen Schritte, von der Entwicklung des Modells über die Suche nach geeigneten Optiken sowie deren Integration und Test werden in der vorliegenden Arbeit beschrieben.

Durch die Auswertung der gewonnenen Kamerabilder und der Detektion verschiedener Emissivitätswerte konnte die Funktionsweise des Optikkonzeptes von VEM verifiziert werden. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass der Einplatinencomputer Raspberry Pi nicht nur als Elektronik eines wissenschaftlichen Instrumentes, sondern auch für einen Einsatz im Feinvakuum geeignet ist. Für den Einsatz des Boards auf Nanosatelliten sollten jedoch weitere Qualifikationstests erfolgen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einführung in die Thematik VEM.....	1
1.1 Infrarotmessungen auf der Venus	1
1.2 Der Venus Emissivity Mapper VEM.....	3
1.3 Funktionsweise von Infrarotkameras	4
2 Anforderungen an den Venus Emissivity Mapper VEM.....	7
2.1 Optische Anforderungen.....	7
2.2 Strukturelle Anforderungen	10
2.3 Elektronische Anforderungen	10
2.4 Zusammenfassung der Anforderungen an VEM	10
3 Anforderungen an das Entwicklungsmodell dieser Masterarbeit.....	11
3.1 Ziele der Masterarbeit	11
3.2 Ableitung von Anforderungen an das Entwicklungsmodell auf Grundlage der Anforderungen von VEM.....	12
3.2.1 Optische Anforderungen.....	12
3.2.2 Strukturelle Anforderungen.....	13
3.2.3 Elektronische Anforderungen.....	14
3.3 Zusammenfassung der Anforderungen des Entwicklungsmodells verglichen mit den Anforderungen von VEM.....	14
4 Vortests mit dem Raspberry Pi im Vakuum.....	15
4.1 Hintergrund der Tests	16
4.2 Vakuumtests des Raspberry Pi	18
4.2.1 Offline Modus	19
4.2.2 Standby Modus	20

4.2.3	Videostreaming Modus	22
4.3	Messung der Temperaturen.....	24
4.4	Auswertung der Raspberry Pi Tests im Vakuum.....	24
5	Design des Entwicklungsmodells.....	26
5.1	Komponentenauswahl.....	26
5.1.1	Telezentrik.....	27
5.1.2	Relaisoptik.....	30
5.1.3	Filter	31
5.1.4	Einplatinencomputer.....	34
5.1.5	Temperatursensoren.....	35
5.2	Konstruktion	37
5.2.1	Gehäuse	37
5.2.2	Optik.....	39
5.2.3	PEL Halterung	44
6	Programmierung der Software.....	45
6.1	Raspberry Pi.....	45
6.2	Raspberry Pi Kamera Programmierung	47
6.3	Temperaturmessung.....	49
6.4	Software des Entwicklungsmodells	50
6.4.1	Allgemeiner Programmablauf des Entwicklungsmodells	50
6.4.2	Benutzerhandbuch für die Steuerung des Entwicklungsmodells	51
6.5	Zusätzliche Programme	52
7	Integration, Aufbau und Justierung des Entwicklungsmodells	53
7.1	Integration der Kamera	54
7.2	Justierung der Optik.....	59
8	Montage und Test des Entwicklungsmodells an der PEL	61

9	Auswertung der Ergebnisse	70
9.1	Bewertung der Testkonfigurationen	70
9.2	Die Auswertung der Aufnahmen der geteilten Probe	72
9.3	Auswertung der Aufnahmen der geteilten Probe der zweiten Testkampagne	77
9.4	Einfluss der Temperatur auf die Messungen	79
10	Optimierungspotenzial des Designs des Entwicklungsmodells sowie des Testaufbaus	80
10.1	Optimierungspotenzial der Konstruktion.....	80
10.2	Optimierungspotenzial der Programmierung.....	84
10.3	Optimierungspotenzial des Testaufbaus	85
11	Fazit	86
	Quellenverzeichnis	89
	Anhang	A

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Atmosphärische Fenster der Venus (Naderi et al, 2015).....	2
Abbildung 2: Optisches Design von VEM (Reess, 2014)	4
Abbildung 3: Planck'sches Strahlungsspektrum	5
Abbildung 4: PSF von VEM (Reess, 2014)	9
Abbildung 5: Probenkarussell der PEL	19
Abbildung 6: Befestigungspunkte der Temperatursensoren beim Vakuumtest des Raspberry Pi	21
Abbildung 7: Temperaturverlauf des Raspberry Pi im Standby Modus	22
Abbildung 8: Temperaturverlauf des Raspberry Pi im Videostreaming Modus	23
Abbildung 9: Temperaturverlauf des Raspberry Pi nach dem Videostreaming Modus	25
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Kameraaufbaus in der Testkonfiguration	26
Abbildung 11: Vereinfachtes Schema einer objektseitigen Telezentrik	27
Abbildung 12: Vereinfachtes Schema einer bildseitigen Telezentrik	28
Abbildung 13: Vereinfachtes Schema einer beidseitigen Telezentrik.....	28
Abbildung 14: Vereinfachtes Schema einer Relaisoptik.....	30
Abbildung 15: Vermessung der Filtertransmission	33

Abbildung 16: Raspberry Pi B+	34
Abbildung 17: Raspberry Pi Kamera NoIR.....	35
Abbildung 18: Temperatursensor DS18B20+	36
Abbildung 19: Pin Layout des Temperatursensors DS18B20+ (Maxim Integrated, 2015b)	37
Abbildung 20: Winkelverbinder der Gehäusestruktur.....	38
Abbildung 21: Lichtfallenkonzept der Masterarbeit exemplarisch gezeigt an einer Ecke des Gehäuses.....	39
Abbildung 22: Optischer Aufbau der Kamera.....	40
Abbildung 23: Telezentrik auf optischem Tisch	41
Abbildung 24: Filterrad ohne eingebaute Filter	43
Abbildung 25: Halterung des Raspberry Pi und der RaspiCam mit Blende	43
Abbildung 26: Kamerahalterung des Entwicklungsmodells für die PEL.....	44
Abbildung 27: Flussdiagramm der Programme des VEM Entwicklungsmodells.....	50
Abbildung 28: Schematischer Ablauf der Bildprozessierung des Entwicklungsmodells	51
Abbildung 29: Gelötete Ethernetkabelverbindung zwischen Buchse und Raspberry Pi.....	54
Abbildung 30: Vorbereitung der RaspiCam in zeitlicher Reihenfolge von links oben nach rechts unten	56
Abbildung 31: Verkleben der Kommunikationsports mit der Außenwand der Struktur	56
Abbildung 32: Ergebnis der Integration der Kamera. Oben links: Seitlicher Blick auf die Stirnseite der geöffneten Kamera. Oben Mitte: Seitlicher Blick auf die Rückseite der geöffneten Kamera. Oben rechts: Gesamtansicht der geschlossenen Kamera. Unten: Draufsicht auf die geöffnete Kamera mit Blick auf die einzelnen Komponenten.	57
Abbildung 33: Kamera mit integrierten Temperatursensoren.....	58
Abbildung 34: Wärmeleitpaste auf dem Raspberry Pi zur effizienteren Übertragung der Wärme auf die Kupferplatte	58
Abbildung 35: Staubschutzdeckel der Kamera	59
Abbildung 36: Die Kamera vor und nach der Justierung im optischen Grenzbereich	60
Abbildung 37: Temperaturverlauf der Kamera während des ersten Tests mit der geteilten Probe.....	62
Abbildung 38: Temperaturverlauf des Schwarzkörpers während des ersten Tests mit der geteilten Probe	63
Abbildung 39: PTFE-Blendenkonstruktion im zweiten Testzyklus.....	67
Abbildung 40: Geteilte Probentasse in Testkonfiguration mit Temperatursensoren	67

Abbildung 41: Temperaturverlauf der Proben während des zweiten Tests mit der geteilten Probe	68
Abbildung 42: Basaltscheibe mit erkennbarem Signal auf der Oberfläche.....	72
Abbildung 43: Falschfarbenbild nach der ersten Prozessierungsstufe	73
Abbildung 44: Segmentierung des Bildes und Definition von interessanten Regionen durch Auswertung der Graustufenverteilung.....	74
Abbildung 45: Verteilung der Pixelwerte über der Aufnahme beim ersten Test	75
Abbildung 46: Umgerechnete Reflektanzmessungen der Materialien aus Spektromettermessungen	76
Abbildung 47: Verteilung der Pixelwerte über der Aufnahme beim zweiten Test	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Anforderungen von VEM sowie von dem Entwicklungsmodell.....	14
Tabelle 2: Entscheidungsmatrix der Telezentriken	29
Tabelle 3: Parameter der verwendeten Telezentrik (Goyo Optical Inc., 2015).....	30
Tabelle 4: Entscheidungsmatrix der Relaisoptiken	31
Tabelle 5: Parameter der verwendeten Relaisoptik (Edmund Optics, 2015b)	31
Tabelle 6: Parameter der verwendeten Filter.....	33
Tabelle 7: Parameter des verwendeten Raspberry Pi Kamera CMOS-Chips (OmniVision Technologies Inc., 2015)	35
Tabelle 8: Konfigurationsbefehle für das Raspberry Pi (Raspberry Pi Foundation, 2015).....	45
Tabelle 9: Raspistill Optionen für das Entwicklungsmodell (Raspberry Pi Foundation, 2015) ...	48
Tabelle 10: Konfigurationsbefehle für die Temperatursensoren (Raspberry Pi Foundation, 2015)	49
Tabelle 11: Testprozedur für die Kamera.....	61
Tabelle 12: Bilder des ersten Testzyklus.....	64
Tabelle 13: Bildauswahl des zweiten Tests mit Blendenkonfiguration	69
Tabelle 14: Emissivität von Komatiit bezogen auf den Schwarzkörper gemessen mit der VEM Kamera und dem Spektrometer nach dem ersten Test	77
Tabelle 15: Emissivität von Komatiit bezogen auf den Schwarzkörper gemessen mit der VEM Kamera und dem Spektrometer nach dem zweiten Test	79

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided Design
CATIA	Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
COTS	Commercial of the Shelf
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EGSE	Electrical Ground Support Equipment
EM	Engineering Model
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EQM	Engineering Qualification Model
ESD	Electro Static Discharge
FOV	Field of View
GIMP	GNU Image Manipulation Program
GND	Ground
GPIO	General Ports Input Output
GUI	Graphical User Interface
HDMI	High Definition Multimedia Interface
IR	Infrarot
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LED	Light Emitting Diode

MERTIS	Mercury Thermal Infrared Spectrometer and Radiometer
NoIR	No Infrared
PEL	Planetary Emissivity Laboratory
PNG	Portable Network Graphics
PSF	Point Spread Function
PTFE	Polytetrafluorethylen
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Signal-Rausch-Verhältnis)
SSH	Secure Shell
TRL	Technology Readiness Level
USB	Universal Serial Bus
VEM	Venus Emissivity Mapper
VERITAS	Venus Emissivity, Radio Science, INSAR, Topography, And Spectroscopy
VIRTIS	Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer
VIS	Visible

1 Einführung in die Thematik VEM

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit dem Entwurf und Bau eines Entwicklungsmodells für eine Infrarotkamera (IR-Kamera). Die auf diesem Entwicklungsmodell basierende IR-Kamera soll zukünftig auf einer Mission zur Venus eingesetzt werden. Die folgende Einführung gibt einen Überblick über die Gründe für Infrarotmessungen auf der Venus und erklärt deren Funktionsweise.

1.1 Infrarotmessungen auf der Venus

Die Venus ist dem Planeten Erde sehr ähnlich. Eine annähernd gleiche Masse sowie ein vergleichbarer Radius und ähnliches Material haben der Venus in der Entwicklungsphase des Sonnensystems ähnliche Rahmenbedingungen wie der Erde gegeben. Trotzdem verlief die Entwicklung der beiden Planeten sehr unterschiedlich. Auf der Venus herrschen Temperaturen von fast 500 Grad und ein Oberflächendruck von ca. 90 Bar, während sich auf der Erde Leben in großer Artenvielfalt entwickeln konnte. Die Klärung dieser unterschiedlichen Entwicklung ist eine der zentralen Fragen in der Wissenschaft, die jedoch durch die Beschaffenheit der Venus, insbesondere der dichten Wolkendecke, erschwert wird. Aufgrund dieser Wolkendecke ist es nicht möglich, die Oberfläche der Venus mit Hilfe von Fernerkundung im sichtbaren Wellenlängenbereich zu analysieren, da die Wolken nur Radarstrahlung ungehindert passieren lassen. Somit gibt es zwar Aussagen über die Oberflächenstruktur, nicht jedoch deren Zusammensetzung. (Helbert, Aufgabenstellung Masterarbeit, 2015)

Um über die thermische Emission der Oberfläche der Venus eine Aussage treffen zu können, muss eine Beobachtung im Infrarotbereich erfolgen, in dem um einen Mikrometer schmale atmosphärische Fenster existieren, die diese Emission durchlassen (Helbert, Aufgabenstellung Masterarbeit, 2015). Der Infrarotbereich des Lichtspektrums liegt zwischen ca. 0,8 μm und 1 mm und wird in die Teilgebiete nahes, mittleres und fernes Infrarot unterteilt, wovon für diese Masterarbeit nur das nahe Infrarot im Bereich von 0,8 bis 1,4 μm interessant ist, da nur dort atmosphärische Fenster auf der Venus liegen (siehe Abbildung 1). Diese ergeben sich dadurch, dass die Wärmestrahlung der Venus durch das CO_2 in der Atmosphäre größtenteils absorbiert wird (Stieglitz & Heinzel, 2012) und eine Beobachtung derselben nur in den Spektren möglich ist, in denen die Absorptionseigenschaften von CO_2 geringer sind. Durch Auswahl einzelner

Spektralkanäle der atmosphärischen Fenster können die meisten Informationen über die Venusoberfläche gewonnen werden.

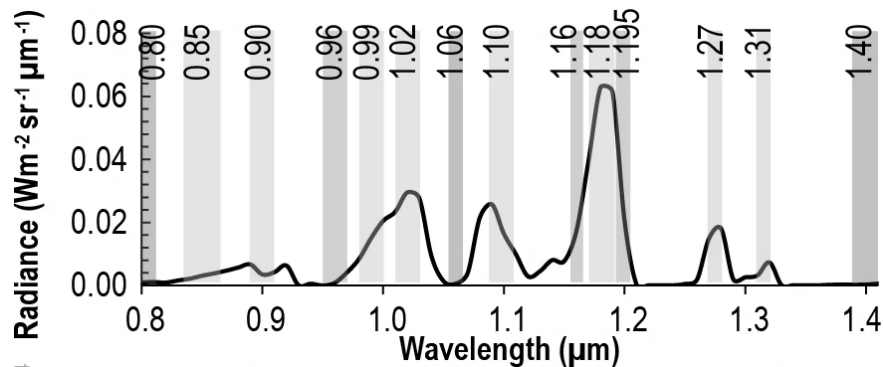


Abbildung 1: Atmosphärische Fenster der Venus (Naderi et al, 2015)

Durch diese atmosphärischen Fenster ergibt sich die Möglichkeit, allein durch Fernerkundung Informationen über die Venus zu sammeln, ohne ein Landemodul auf der Oberfläche absetzen zu müssen. Ein Landemodul hätte die Herausforderung, eine durch Radaraufnahmen nur grob bekannte Oberfläche zu erkunden. Zusätzlich wäre eine größere Anzahl an wissenschaftlichen Experimenten notwendig, um das bisher unbekannte Oberflächenmaterial analysieren zu können. Durch eine zuvor erfolgte Fernerkundung der Oberflächenzusammensetzung können die Experimente auf einem solchen Landemodul speziell auf die Oberfläche der Venus abgestimmt werden, um den Nutzen des Landemoduls zu optimieren.

Das Vorhandensein der atmosphärischen Fenster wurde bereits bei der Venus Express Mission durch das Instrument VIRTIS (Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer) bestätigt und diese auch zur Erkundung der Oberfläche genutzt. Allerdings hat die Mission eine elliptische Umlaufbahn mit nur einer Hemisphäre abgedeckt, sodass nicht der gesamte Planet untersucht werden konnte. Außerdem war VIRTIS mit einer sehr großen spektralen Bandbreite im Infrarotbereich ausgerüstet, weswegen die Signale der schmalen atmosphärischen Fenster zum Teil nur schlecht oder gar nicht detektierbar waren. Obwohl viele Daten und neue Erkenntnisse aus der Mission gezogen werden konnten, zum Beispiel eine genauere Rotationsrate oder Hinweise auf vulkanische Aktivität in der jüngeren Planetengeschichte, so entstanden auch neue Fragen, die durch die vorliegenden Daten nicht ausreichend beantwortet werden konnten. (Helbert, Aufgabenstellung Masterarbeit, 2015)

1.2 Der Venus Emissivity Mapper VEM

Als Resultat der, zur Beantwortung der wissenschaftlichen Fragen, nicht ausreichenden Ergebnisse und Daten der Venus Express Mission wurde entschieden, eine neue Infrarotkamera zu entwickeln, die speziell auf die atmosphärischen Fenster der Venus abgestimmt sein soll. Diese Kamera soll den Namen Venus Emissivity Mapper (VEM) erhalten und Teil der Venus Discovery-Mission VERITAS (Venus Emissivity, Radio Science, INSAR, Topography, And Spectroscopy) sein. (Naderi et al, 2015) VEM soll im Gegensatz zu VIRTIS auf die nun genauer bekannten atmosphärischen Fenster eingestellt werden, sodass eine deutlich verbesserte Informationsgewinnung ermöglicht wird. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei der geplanten Mission unter anderem um eine Radarmission handelt, können die gewonnenen Daten auch zusätzlich geographisch lokalisiert werden. Somit werden neben einer verbesserten Oberflächenstruktur auch Aussagen über die jeweilige Oberflächenzusammensetzung ermöglicht.

Das Projekt VEM befindet sich bisher noch in der Konzeptphase, was bedeutet, dass bislang kein Testmodell der IR-Kamera existiert. Das Optikkonzept von VEM soll eine Variation der VIRTIS-Kamera werden, die auf Venus Express und Rosetta eingesetzt wird. Allerdings sind mehrere Neuerungen geplant, um bessere Ergebnisse erzielen zu können. So soll die gesamte Elektronik von MERTIS (Mercury Thermal Infrared Spectrometer and Radiometer) übernommen werden, wie sie auf BepiColombo eingesetzt wird. Der Detektor wird durch einen aktiv gekühlten, ebenfalls bereits geflogenen, CCD-Chip der Firma Sofradir mit einer besseren Empfindlichkeit im gewünschten Wellenlängenbereich ersetzt. (Naderi et al, 2015) Somit ist ein Großteil der Kamerakomponenten bereits geflogen und qualifiziert, wodurch teure Entwicklungskosten für VEM minimiert werden können. Dieser Großteil der geplanten Komponenten von VEM hat demnach einen TRL (Technology Readiness Level) von mindestens 7, was keine weitere Qualifizierung erfordert. Die einzige Komponente von VEM, die aktuell TRL 4 ist, ist die Optik. Es gibt zwar einen optischen Grobentwurf (siehe Abbildung 2), doch bisher ist diese Optik noch nicht gebaut oder untersucht worden. Dies soll mit der vorliegenden Masterarbeit erfolgen, damit der TRL des Optikkonzepts gesteigert werden kann. (Helbert, Aufgabenstellung Masterarbeit, 2015)

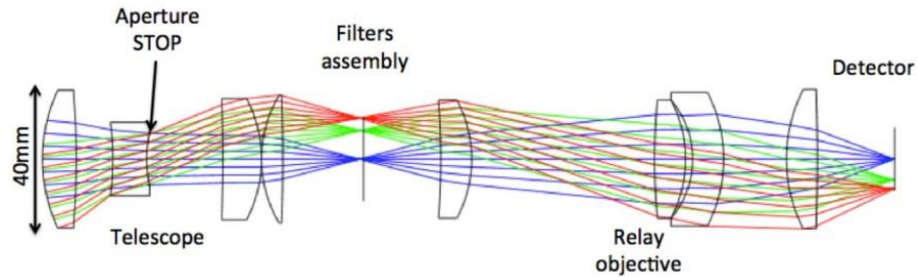


Abbildung 2: Optisches Design von VEM (Reess, 2014)

Mit dem Aufbau eines Entwicklungsmodells soll unter Verwendung von COTS-Komponenten (Commercial of the Shelf) eine günstige Basisversion der späteren IR-Kamera VEM entstehen, die für erste Labortests und sich daraus ergebende Designanpassungen zur Verfügung steht. Bei MERTIS konnten gute Erfahrungen mit dem Aufbau eines Entwicklungsmodells vor den eigentlichen Modellen gesammelt werden, weswegen dies analog bei VEM praktiziert werden soll (Helbert, Informationen zu VEM, 2015). Aufgrund der Kostenphilosophie wurde auch entschieden, anstatt der MERTIS Elektronik und des aktiv gekühlten CCD-Chips einen Einplatinencomputer mit angeschlossener Infrarotkamera zu verwenden.

1.3 Funktionsweise von Infrarotkameras

Die Funktionsweise der IR-Kamera basiert auf dem Prinzip der Detektion von Infrarotstrahlung, die von einer beispielsweise auf 450°C erhitzten Probe abgegeben wird. Diese Strahlung wird mit Hilfe der Optik auf den CCD-Chip weitergeleitet, wo durch den photoelektrischen Effekt Elektronen auf dem jeweiligen Pixel, wo die Strahlung auftrifft, ausgelöst werden. (Brieß, Detektoren, 2015) Die Anzahl der ausgelösten Elektronen gibt dann die Helligkeit des jeweiligen Pixels an, wobei dies im Verhältnis zum Gesamtbild steht. Dabei wird bei einem Bild mit einer Auflösung von 8 Bit der höchste Pixelwert mit 255 angegeben, was der Farbe Weiß entspricht, und der kleinste mit 0, also der Farbe Schwarz. Es stehen somit 256 Graustufen zur Verfügung.

Die durch den CCD-Chip aufgenommene Strahlung entspricht der emittierten Strahlung des Materials bei einer bestimmten Temperatur. Da unterschiedliche Materialien untersucht werden, muss es eine Referenzprobe geben, die in dem betrachteten Wellenlängenbereich ein nahezu vollständiges Abstrahlungsverhalten, also eine Emissivität von 1, aufweist, der sogenannte ideale Schwarzkörper. Schwarzkörper generieren, abhängig von ihrer Temperatur, unterschiedliche Signalverläufe, die anhand der Formel

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)}, \quad \text{mit } c_1 = 2\pi c^2 h \text{ und } c_2 = \frac{hc}{k},$$

berechnet und mit Hilfe des Planck'schen Strahlungsspektrums grafisch dargestellt werden können (siehe Abbildung 3). (Wolfe, Sources, 1998)

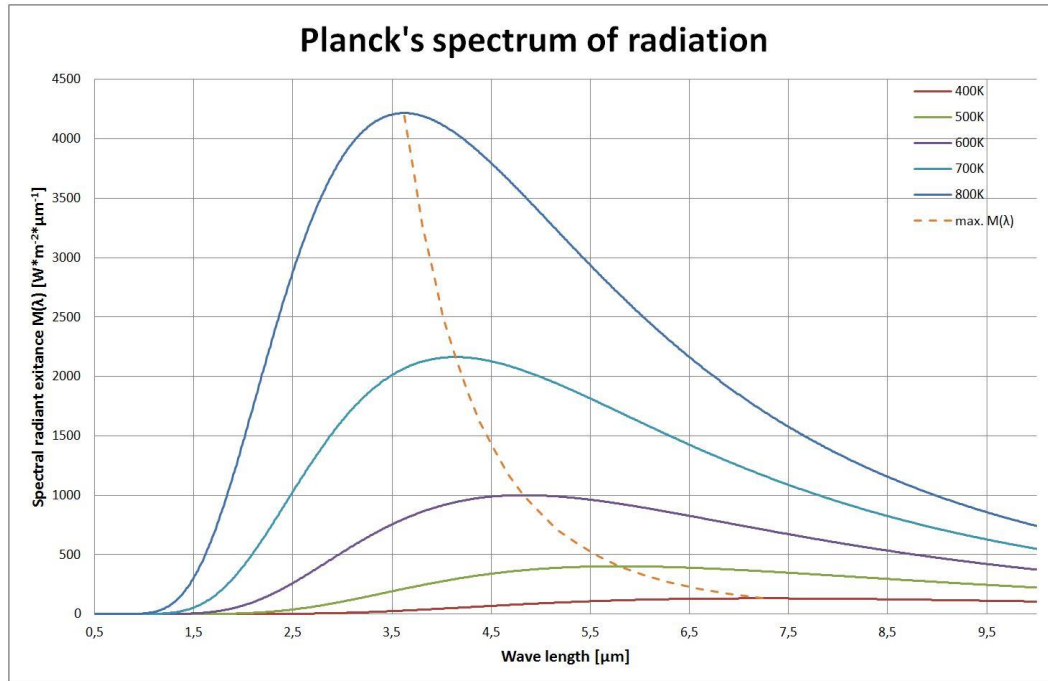


Abbildung 3: Planck'sches Strahlungsspektrum

Für diese Masterarbeit ist insbesondere der Bereich von 470 bis 770 Kelvin zwischen 0,8 und 1,4 μm interessant. Aufgrund der theoretischen Natur von Schwarzkörpern, da es kein Material gibt, das die gesamte aufgenommene Energie wieder abstrahlt, müssen reale Stoffe genutzt werden, die diesen Kurvenverläufen sehr nahekommen. Deren Emissivität liegt, abhängig vom Schwarzkörpermaterial, geringfügig unter der Idealkurve, sollte jedoch im Verhältnis größer sein als die aller zu untersuchenden Probenmaterialien, damit eine verlässliche Basis für Messungen zur Verfügung steht.

Wie in Abbildung 3 deutlich zu erkennen ist, ist das abgestrahlte Signal des idealen Schwarzkörpers in dem betrachteten Wellenlängenbereich sehr gering, sodass die geplanten Beobachtungen theoretisch nur zu sehr kleinen Informationsgewinnen führen würden. Da jedoch der Kurvenverlauf direkt von der Temperatur abhängt, wäre eine Erhöhung derselben eine Möglichkeit zur Steigerung des Signals der Strahlung, so wie es im Wien'schen

Verschiebungsgesetz beschrieben wird (Riedl, 2002). Ein Nachteil daran ist aber, dass mit steigender Temperatur des Sensors mehr Elektronen ausgelöst werden und damit dessen Dunkelstrom steigt, der als Rauschen des Bildes wiederum zu Signalverlust führt. Durch Bildung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses (SNR) kann im Endeffekt eine Aussage über die Qualität eines Bildes getroffen werden, da es unter Berücksichtigung verschiedener Rauschquellen, wie dem der angeschlossenen Elektronik, eine Kalkulation der benötigten Signalstärke zulässt, sodass im Endeffekt das eigentliche Ziel auch detektiert werden kann. Ein wichtiger Punkt bei der Bildaufnahme im infraroten Bereich ist demnach also, eine hohe Temperatur des beobachteten Objektes zu haben und gleichzeitig die Kamera und deren Detektor so kühl wie möglich zu halten.

Bei der Beobachtung der Venus bildet die Temperaturerhöhung der Probe jedoch ein Problem, da die maximale Temperatur der Venusoberfläche begrenzt ist und nicht beeinflusst werden kann. Um dieses Problem zu lösen muss also das eintreffende Signal künstlich verstärkt oder das Rauschen minimiert werden. Um das SNR zu beeinflussen gibt es mehrere Ansätze:

- Die Integrationszeit, die Aufnahmedauer eines Bildes, verlängern und somit durch eine längere Belichtungszeit mehr Elektronen pro Pixel auf dem Sensor auslösen, wobei das Zielgebiet während der Aufnahme stationär sein muss.
- Mehrfach das gleiche Zielgebiet aufnehmen und diese Bilder überlagern, sodass auch schwache Lichtquellen deutlicher werden, wobei ebenfalls das Ziel stationär sein muss.
- Eine Kombination aus den beiden vorher genannten Verfahren.
- Durch einen gekühlten, rauscharmen Sensor die Empfindlichkeit der CCD soweit steigern, dass auch schwache Signale bei kurzer Integrationszeit detektiert werden können.

Die Möglichkeit die Integrationszeit zu erhöhen wird durch die hohe Umlaufgeschwindigkeit der Raumsonde um die Venus und die damit sehr kurze Verweilzeit der CCD über einem Gebiet begrenzt. Auch bei der Überlagerung von Bildern besteht der Nachteil, dass sich die Belichtungsverhältnisse durch unterschiedliche Aufnahmepositionen verändern, wodurch der Strahleinfallwinkel nicht mehr identisch ist und komplexe Korrekturalgorithmen erforderlich wären. Es wäre möglich, die jeweils geschossene Einzelaufnahme mit sich selbst zu überlagern, was einer längeren Integrationszeit entsprechen würde, allerdings würde das Rauschen durch

dieses Verfahren ebenfalls verstärkt werden. Aus den genannten Gründen soll bei VEM dieses Problem mit Hilfe des bereits angesprochenen aktiv kryo-gekühlten CCD-Sensors umgangen werden. Dieser wird künstlich auf wenige Kelvin heruntergekühlt, sodass der Dunkelstrom und damit das Rauschen, minimiert wird. Außerdem wird eine rauscharme Elektronik verwendet, wodurch das SNR weiter verbessert werden kann. Da das zu beobachtende Ziel, die Venusoberfläche, ca. 450 Grad Celsius besitzt, ist ein entsprechend gutes SNR zu erwarten.

2 Anforderungen an den Venus Emissivity Mapper VEM

Der Venus Emissivity Mapper VEM ist eine Infrarotkamera, die in mehreren Spektralbändern im nahen Infrarot die Oberfläche der Venus erforschen soll. Eine Herausforderung bei der Erkundung der Venus liegt in der Nutzung der atmosphärischen Fenster, durch die die thermische Strahlung der Venusoberfläche die dichte Atmosphäre passieren kann. Die von VEM auf diesem Weg aufgenommene Infrarotstrahlung kann dann, unter Kenntnis der vorherrschenden Temperatur und durch Vergleich mit bekannten Emissivitäten, genutzt werden, um auf die Oberflächenmaterialien der Venus zurückzuschließen. Trotz der bislang gesammelten Erfahrungen durch andere Missionen bildet die Venus mit ihrer hohen Oberflächentemperatur, die unter anderem durch vulkanische Aktivitäten begründet ist, eine zusätzliche Herausforderung für dieses bekannte Beobachtungsverfahren.

Resultierend aus diesem Einsatzbereich der VEM Kamera ergeben sich eine Reihe von Anforderungen aus verschiedenen Gebieten, die im Dokument „VERITAS – Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, And Spectroscopy“ (Naderi et al, 2015) beschrieben sind und im Folgenden erläutert werden.

2.1 Optische Anforderungen

Da es sich bei VEM um eine Infrarotkamera handelt, existiert eine Vielzahl an optischen Anforderungen, die für diese Masterarbeit auszugsweise betrachtet und erläutert werden. Um überhaupt definieren zu können, welches Gebiet der Venusoberfläche mit VEM beobachtet werden kann, ist die Definition des Gesichtsfeldes (Field of View – FOV) der Kamera unabdingbar. Um das FOV von VEM festlegen zu können, wurde der Grundsatz verfolgt, ein möglichst großes Gebiet der Venusoberfläche während eines Überfluges zu scannen. Zu diesem Zweck wäre ein hoher Orbit günstig, da somit die Planetenoberfläche großflächig und mehrfach

gescannt werden könnte. Da jedoch die anderen Instrumente, die neben VEM auf der geplanten Mission mitfliegen werden, alle eine relativ geringe Überflughöhe benötigen, wurde als Kompromiss eine Flughöhe von 400 Kilometern oberhalb der Venusoberfläche gewählt. Die räumliche Auflösung von VEM soll bei ca. 50 x 50 km liegen (Naderi et al, 2015). Dies ist das Resultat der Streuung der infraroten Strahlung an den Wolkenpartikeln, weswegen auf eine höhere Auflösung verzichtet wird (Helbert, Informationen zu VEM, 2015). Um die geringe Flughöhe zu kompensieren wurde beschlossen, dass VEM, unter Ausnutzung eines weitwinkligen Objektivs, ein FOV von ungefähr 30 Grad besitzen soll.

Wie in Kapitel 1.2 bereits erklärt, sieht das optische Konzept von VEM die Verwendung mehrerer einzelner Linsen vor, welche als Kaufteile verfügbar sein und nicht als Sonderanfertigung entwickelt werden sollen. In ihrer Anordnung können die Linsen in eine Telezentrik sowie in eine Relaisoptik unterteilt werden.

Der zu beobachtende spektrale Wellenlängenbereich ist durch die bereits genannten atmosphärischen Fenster der Venus auf den nahen Infrarotbereich beschränkt. Die bei VEM genutzten Wellenlängen sind aus dem Bereich zwischen 0,8 μm und 1,4 μm gewählt und auf 14 Filterkanäle aufgeteilt worden. Sie sollen die atmosphärischen Fenster möglichst gut abdecken, sodass auch bei den schwächeren Transmissionsfenstern ein hoher Informationsgewinn ermöglicht wird. Die Transmission der einzelnen Filter soll über 95 % liegen. Für die Wahl der Spektralbänder im nahen Infrarot gab es unterschiedliche Zielstellungen, zum Beispiel sollen durch VEM nicht nur Oberflächen-, sondern auch Wolkenbeobachtungen ermöglicht werden.

Um eine Aussage über die Qualität des optischen Systems VEM treffen zu können, kann die Point Spread Function (PSF) bestimmt werden. Diese gibt darüber Auskunft, wie ein Lichtpunkt von dem optischen System der Kamera auf dem Detektor wiedergegeben wird. Das Bild der Punktquelle entspricht dann der PSF. Da durch ein reales optisches System immer Abbildungsfehler entstehen werden und auch die Güte des Zusammenbaus der Kamera die Bildqualität mit beeinflusst, wird der Lichtpunkt nicht nur auf einem Pixel des entstehenden Bildes, sondern auch auf benachbarten Pixeln abgebildet sein. Es entsteht eine wellenförmige Verteilung mit Helligkeitsmaxima um das Zentralpixel, die PSF. Der Winkelabstand zum ersten Maximum, der durch das Rayleigh-Kriterium $\alpha = 1,22 * \frac{\lambda}{D}$ berechnet werden kann (Brieß,

Grenzen der örtlichen Auflösung, 2015), ergibt dabei den minimalen Abstand zwischen zwei Bildpunkten, sodass diese gerade noch optisch aufgelöst werden können, wobei λ der Wellenlänge und D der Apertur der Optik entspricht. Somit ist es für ein optisches System das Ziel, einen möglichst kleinen Winkelabstand zu erreichen, da dann das beste theoretische Auflösungsvermögen der Optik erreicht worden ist. Für VEM ergibt das Rayleigh-Kriterium bei zum Beispiel 900nm einen Wert von

$$\alpha = 1,22 * \frac{900\text{nm}}{40\text{mm}} = 0,0016^\circ.$$

Ein alternatives Verfahren zur Ermittlung der PSF eines optischen Systems ist die Nutzung der Software Zemax (Zemax LLC, 2015). Mit Hilfe dieses Programms wurde für die geplante Optik von VEM, die in Abbildung 2 zu sehen ist, die PSF theoretisch ermittelt (siehe Abbildung 4).

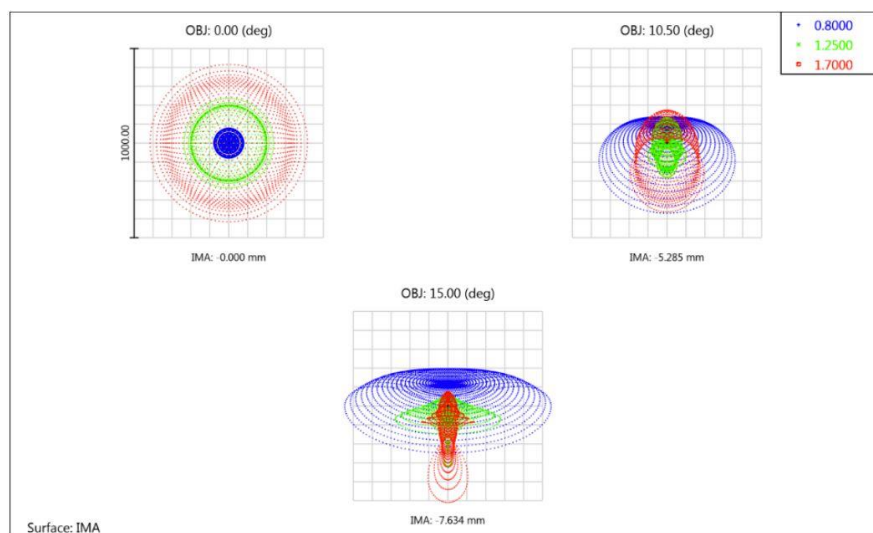


Abbildung 4: PSF von VEM (Reess, 2014)

Anhand dieser Ergebnisse ist deutlich zu erkennen, dass die PSF bei den verschiedenen Wellenlängen große Unterschiede aufweist, was die Vergleichbarkeit zweier optischer Systeme anhand der PSF erschwert. Außerdem wird zur Erzeugung bzw. Überprüfung der realen PSF eines Systems wie VEM eine genaue Kenntnis der Linsenordnung und –materialien benötigt, die aufgrund der Tatsache, dass VEM bisher nur als Konzept existiert, nicht nachgemessen werden kann.

2.2 Strukturelle Anforderungen

Die bei VEM vorgesehene Filterebene mit seinen insgesamt 14 Kanälen im nahen Infrarot soll so beschaffen sein, dass alle Filterkanäle gleichzeitig dieselbe Oberfläche scannen. Um dies zu realisieren, sollen alle 14 Filterkanäle auf einem Filter zu einem Filterarray zusammengefasst werden, sodass sich keine beweglichen Komponenten im optischen Pfad befinden, wie es bei einem Filterradd mit mehreren einzelnen Filtern der Fall wäre. Diese Sonderanfertigung wird dann zentriert im optischen Pfad angebracht und lässt die aufgenommenen Signale in den genau spezifizierten Wellenlängen passieren.

Um das durch die Optik aufgenommene Signal möglichst gut detektieren zu können, muss die Struktur der Kamera eine aktive Kühlung des Detektors zulassen. Durch einen geeigneten Wärmeabtransport kann somit das SNR erhöht und die Bildqualität verbessert werden.

2.3 Elektronische Anforderungen

Durch die Vorgabe, die 14 Filterkanäle von VEM zu einem Filterarray zusammenzufügen, wird auch erreicht, dass nur ein Detektor und auch nur eine dazugehörige Elektronik benötigt werden, um die Bildaufnahmen durchzuführen. Dies reduziert, neben den Kosten für VEM, auch die Baugröße der Kamera, die Masse des Systems, den Energieverbrauch sowie den Speicherplatz, der für 14 parallel arbeitende Kameras anfallen würde.

Eine weitere Anforderung an VEM, die als Möglichkeit dient, neue Kosten einzusparen, ist die Tatsache, dass für VEM die bereits erprobte Elektronik der MERTIS Kamera sowie eine raumfahrtqualifizierte Variante des Detektors von VIRTIS verwendet werden sollen, wodurch die teuren Entwicklungskosten eines Detektors mit zugehörigem Elektronikboard entfallen werden.

2.4 Zusammenfassung der Anforderungen an VEM

Die oben beschriebenen Anforderungen an VEM, die in diesem Umfang für die Masterarbeit ausgewählt wurden und nur einen Teil der gesamten Anforderungen darstellen, sind im Folgenden der Übersicht halber nochmals zusammengefasst worden:

1. VEM soll in einer Orbithöhe von 400km betrieben werden.
2. VEM soll ein weitwinkliges Objektiv verwenden.
3. VEM soll ein FOV von ungefähr 30 Grad besitzen.

4. Die Telezentrik und die Relaisoptik von VEM sollen aus einzelnen Linsen bestehen, die als Kaufteile verfügbar sein sollen.
5. Für die Venusbeobachtungen mit VEM soll das nahe Infrarot im Wellenlängenbereich von $0,8\ \mu\text{m}$ bis $1,4\ \mu\text{m}$ genutzt werden.
6. Es sollen 14 Filterkanäle genutzt werden.
7. Die Transmission der einzelnen Filter soll bei mindestens 95% liegen.
8. VEM soll sowohl für Oberflächenbeobachtungen als auch für Wolkenbeobachtungen der Venus geeignet sein.
9. Die 14 Filterkanäle von VEM sollen alle auf einen Filter in einem Filterarray zusammengefasst werden.
10. Der Detektor von VEM soll aktiv gekühlt werden.
11. Die VEM Kamera soll einen verbesserten VIRTIS Detektor sowie die MERTIS Elektronik verwenden, um Entwicklungszeit und Kosten einzusparen.
12. VEM soll eine hochkompakte und leichte Struktur verwenden.

3 Anforderungen an das Entwicklungsmodell dieser Masterarbeit

Das Entwicklungsmodell, das im Zuge dieser Masterarbeit aufgebaut wird, soll die Funktionsweise der geplanten VEM IR-Kamera, unter Verwendung des gewählten Optikkonzepts, demonstrieren. Da einige Subsysteme von VEM bereits im Einsatz sind oder kurz vor Missionsstart stehen, muss nicht die gesamte IR-Kamera während der Masterarbeit aufgebaut und qualifiziert werden, sondern nur die noch nicht gebauten Komponenten. Da es sich hierbei vor allem um Optikkomponenten handelt, besteht die Hauptaufgabe dieser Masterarbeit in dem Aufbau des optischen Komponentenanteils von VEM.

3.1 Ziele der Masterarbeit

Die Ziele der Masterarbeit sind, neben der Einarbeitung in die Thematik VEM, der Entwurf, der Bau und der Test eines Entwicklungsmodells, dass das Optikkonzept von VEM nachweisen soll. Dazu ist eine Einarbeitung in die Thematik VEM sowie den verwendeten Einplatinencomputer Raspberry Pi notwendig.

Für die Erstellung des Entwicklungsmodells müssen aus den Anforderungen an VEM die Anforderungen an das Entwicklungsmodell abgeleitet werden, wobei die Umweltbedingungen an

der Venus mit berücksichtigt werden sollen. Das Entwicklungsmodell soll als Vereinfachung drei anstatt der geplanten 14 Filter verwenden sowie die Elektronik und den Detektor durch Raspberry Pi Produkte ersetzen. Die dafür notwendigen Programmierarbeiten sind ebenfalls Teil der Arbeit.

Nach Abschluss der Designphase soll das Modell aufgebaut und mit Hilfe von Venus-Analogproben in der Hochtemperaturkammer PEL, dem Planetary Emissivity Laboratory am DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) getestet und qualifiziert werden. Dadurch soll, neben der Untersuchung der Eignung des Raspberry Pi als Instrumentenkontroller für mögliche Nanosatellitenmissionen, das Optikkonzept von VEM auf Basis des Entwicklungsmodells analysiert und verifiziert werden.

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Anforderungen an das Entwicklungsmodell und deren Parallelität hinsichtlich VEM erläutert. Damit werden die Ziele dieser Masterarbeit um detaillierte Anforderungen an das Entwicklungsmodell erweitert.

3.2 Ableitung von Anforderungen an das Entwicklungsmodell auf Grundlage der Anforderungen von VEM

Aufgrund der Randbedingungen dieser Masterarbeit hinsichtlich des Zeitrahmens sowie des Budgets, die beide deutlich beschränkt sind, müssen bei dem Entwicklungsmodell einige Vereinfachungen und Einschränkungen vorgenommen werden. Diese Einschränkungen betreffen auch die Übernahme einiger Anforderungen von VEM, ohne jedoch die Vergleichbarkeit des Entwicklungsmodells mit der VEM Kamera insgesamt aufgeben zu müssen.

3.2.1 Optische Anforderungen

Allein aufgrund des Einsatzes des Entwicklungsmodells auf der Erde müssen zwei der in Kapitel 2 genannten Anforderungen von VEM vernachlässigt werden. So wird das Entwicklungsmodell nicht um einen Orbit um die Venus fliegen und dementsprechend auch nicht für Wolkenbeobachtungen zur Verfügung stehen.

Um jedoch die Hauptaufgabe der Masterarbeit, die Verifikation des Optikkonzepts von VEM, erfüllen zu können, muss auch die Optik des Entwicklungsmodells aus einer Telezentrik sowie einer Relaisoptik aufgebaut werden, zwischen die Filter aus verschiedenen Spektralkanälen platziert werden. Außerdem muss die Telezentrik eine weitwinklige, bildseitige Telezentrik sein,

damit der geforderte Öffnungswinkel von 30 Grad eingehalten werden kann. Weiterhin wird auch das Entwicklungsmodell den nahen Infrarotbereich zwischen $0,8\ \mu\text{m}$ und $1,4\ \mu\text{m}$ nutzen.

Anders als bei der VEM Kamera, bei der die Optik aus nacheinander positionierten Kauflinsen bestehen soll, wird aufgrund der Ausrichtungsauigkeit beim Aufbau des Entwicklungsmodells im Rahmen dieser Arbeit auf einzelne Linsen zugunsten einer fertig integrierten Telezentrik und Relaisoptik verzichtet. Weiterhin wurde entschieden, dass es im Rahmen eines Entwicklungsmodells ausreichend ist, anstatt der geplanten 14 Filter in einem Filterarray, drei entkoppelte Filter zu verwenden, um das Funktionsprinzip zu demonstrieren. Trotzdem soll die Anforderung hinsichtlich der Beschaffung von ausschließlich Katalogkomponenten für die Optik eingehalten werden, um die Entwurfsidee von VEM der alleinigen Verwendung von Katalogkomponenten beizubehalten. Die Transmission der Filter sollte dabei so hoch wie möglich liegen.

Die theoretische Bewertung des Entwicklungsmodells mit Hilfe der PSF ist in dem Rahmen dieser Masterarbeit nicht realisierbar, da durch die Verwendung fertig integrierter Optiksyste me die notwendigen Parameter der Optiken wie Linsenkrümmung und genaue Positionen zueinander für die Berechnung nicht zur Verfügung stehen. Optional kann durch Beobachtung einer Lichtpunktquelle in einer bestimmten Wellenlänge die reale PSF des Entwicklungsmodells aufgenommen werden.

3.2.2 Strukturelle Anforderungen

Das strukturelle Design von VEM sieht aufgrund des Einsatzes im Weltraum ein kompaktes und hochintegriertes Design vor, das im Rahmen dieser Masterarbeit nicht umgesetzt werden kann und für erste Untersuchungen an einem Entwicklungsmodell auch nicht erforderlich ist. Für diese Arbeit wird ein modifiziertes Design verwendet, das neben einer einfachen Handhabung der Kamera zum Beispiel auch den Zugriff auf die geplante Filterebene ermöglichen muss, da diese zur Auswahl der einzelnen Filter beweglich gestaltet werden soll. Obwohl bei VEM die Anforderung existiert, keine beweglichen Teile im optischen Pfad zu haben, wird beim Entwicklungsmodell zu ersten Test- und Demonstrationszwecken eine bewegliche Filterebene verwendet.

Der Detektor von VEM soll aktiv gekühlt werden, was zu einem großen Teil eine Aufgabe der Struktur ist. Diese Anforderung wird bis zu einem gewissen Punkt durch das Entwicklungsmodell ebenfalls übernommen, damit die Elektronikkomponenten innerhalb ihrer Temperaturspezifikationen verbleiben.

3.2.3 Elektronische Anforderungen

Die Elektronik und der Detektor von VEM werden in dieser Masterarbeit für das Design des Entwicklungsmodells nicht verwendet, da diese bereits durch den Einsatz in früheren Missionen (zum Beispiel BepiColombo, Rosetta und VenusExpress) qualifiziert sind. Aufgrund dessen soll ein COTS-Ansatz genutzt werden, das heißt, dass die Elektronik und der Detektor im Wesentlichen durch fertige Kauflösungen ersetzt werden können. Dies ermöglicht einen verhältnismäßig einfachen und schnellen Aufbau des Entwicklungsmodells. Als Elektronik für das Entwicklungsmodell wurde ein Einplatinencomputer ausgewählt, von denen es unterschiedliche Modelle gibt, die je nach Preislage eine wachsende Anzahl von Funktionen und eine höhere Komplexität aufweisen. Für diese Masterarbeit wurde entschieden, das Raspberry Pi zu verwenden, da dieses aufgrund seiner extrem hohen Verbreitung weltweit als einer der bekanntesten und gebräuchlichsten Einplatinencomputer gilt, der aktuell auf dem Markt erhältlich ist. Ein besonderer Vorteil des Raspberry Pi, der die Wahl dieses Boards stark beeinflusst hat, ist eine modular anschließbare Infrarotkamera. Die gewählten Elektronikkomponenten, Raspberry Pi und zugehörige Module, werden in Kapitel 5.1.4 erläutert.

3.3 Zusammenfassung der Anforderungen des Entwicklungsmodells verglichen mit den Anforderungen von VEM

Tabelle 1 listet die Anforderungen von VEM sowie die des Entwicklungsmodells auf und stellt diese gegenüber.

Tabelle 1: Vergleich der Anforderungen von VEM sowie von dem Entwicklungsmodell

Themengebiet	Anforderung von VEM	Anforderung des Entwicklungsmodells
Orbit	VEM soll in einer Orbithöhe von 400km betrieben werden.	Das Entwicklungsmodell soll an der PEL mit einem Objektstand von 29 cm betrieben werden.
Objektiv	VEM soll ein weitwinkliges Objektiv verwenden.	Das Entwicklungsmodell soll ein weitwinkliges Objektiv verwenden.

Themengebiet	Anforderung von VEM	Anforderung des Entwicklungsmodells
FOV	VEM soll ein FOV von ungefähr 30 Grad besitzen.	Das Entwicklungsmodell soll ein FOV von ungefähr 30 Grad besitzen.
Linsen	Die Telezentrik und die Relaisoptik von VEM sollen aus einzelnen Linsen bestehen, die als Kaufteile verfügbar sein sollen.	Die Telezentrik und die Relaisoptik des Entwicklungsmodells sollen aus eigenständigen Optiksystemen bestehen, die als Kaufteile verfügbar sein sollen.
Nahes Infrarot (NIR)	Für die Venusbeobachtungen mit VEM soll das nahe Infrarot im Wellenlängenbereich von 0,8 μm bis 1,4 μm genutzt werden.	Für die Venusanalogprobenbeobachtung mit dem Entwicklungsmodell soll das nahe Infrarot im Wellenlängenbereich von 0,8 μm bis 1,4 μm genutzt werden.
Filteranzahl	Es sollen 14 Filterkanäle genutzt werden.	Es sollen drei Filterkanäle genutzt werden.
Filtertransmission	Die Transmission der einzelnen Filter soll bei mindestens 95% liegen.	Die Transmission der einzelnen Filter soll bei mindestens 60% liegen.
Zielgebiet der Beobachtung	VEM soll sowohl für Oberflächenbeobachtungen als auch für Wolkenbeobachtungen der Venus geeignet sein.	Das Entwicklungsmodell soll für Beobachtungen von Venusanalogproben in der PEL geeignet sein.
Filtertyp	Die 14 Filterkanäle von VEM sollen alle auf einem Filterarray untergebracht werden.	Die drei Filterkanäle des Entwicklungsmodells sollen auf drei einzelnen Filtern untergebracht werden.
Detektor	Der Detektor von VEM soll aktiv gekühlt werden.	Die Elektronik des Entwicklungsmodells soll gekühlt werden.
Elektronik	Die VEM Kamera soll einen qualifizierten Detektor sowie die MERTIS Elektronik verwenden, um Entwicklungszeit und Kosten einzusparen.	Das Entwicklungsmodell soll den Detektor und die Elektronik von VEM durch Raspberry Pi Komponenten ersetzen, um die Kosten des Modells zu reduzieren.
Struktur	VEM soll eine hochkompakte und leichte Struktur verwenden.	Die Struktur des Entwicklungsmodells soll einfach aufgebaut sein, um einen leichten Zugriff und einfache Handhabung während der Tests zu ermöglichen.

4 Vortests mit dem Raspberry Pi im Vakuum

Neben dem Aufbau des Entwicklungsmodells war es Teil der Masterarbeit zu untersuchen, ob der gewählte Einplatinencomputer, das Raspberry Pi Modell B+, für Raumfahrtmissionen als Instrumentenkontroller für Nanosatelliten oder für Suborbitalflüge geeignet ist, wobei diese Untersuchung im Rahmen der Arbeit auf die Eignung des Raspberry Pi im Vakuum beschränkt wurde.

4.1 Hintergrund der Tests

Der bis heute in der Praxis angewandte Entwicklungsablauf eines Raumfahrtinstrumentes führt oftmals zu sehr langen Entwicklungszeiten einer Komponente, die wiederum die Kosten des Projektes in die Höhe treiben. Mit den in dieser Masterarbeit durchgeführten Tests zur Untersuchung eines Einplatinencomputers soll erprobt werden, ob die zwei Faktoren Zeit und Kosten durch dessen Einsatz minimiert werden können.

Nachfolgend sind die Schritte des traditionellen Entwicklungsablaufs von Raumfahrtinstrumenten verkürzt gelistet (European Cooperation for Space Standardization, 2007):

1. Beschreibung der Funktionalität des zu entwickelnden Instruments durch Spezifikationen.
2. Entwurf eines Entwicklungsmodells anhand der beschriebenen Spezifikationen.
3. Aufbau des Entwicklungsmodells (Soft- und Hardware) und Test der Funktionalität.
4. Entwicklung eines „Engineering Model“ (EM) und/oder „Engineering Qualification Model“ (EQM) aus den Ergebnissen des Entwicklungsmodells.
5. Aufbau der gewünschten Modelle (EM und/oder EQM).
6. Test und Qualifikation der Modelle (Thermalvakuum-, Schock- und Vibrationstests, Strahlungstests (abhängig von Einsatzort und Anfälligkeit), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)).
7. Bau des Flugmusters anhand der Ergebnisse aus den Tests des EQMs (nach gegebenenfalls notwendigem Redesign).

Die hier beschriebene Prozesskette wird in der von der europäischen Raumfahrt genutzten ECSS (European Cooperation for Space Standardization), hier in vereinfachter und gekürzter Form, so vorgeschrieben, sodass nahezu sämtliche Instrumente aus dem europäischen Raum diesen Lebenszyklus aufweisen. Prinzipiell ist dieser Ansatz zu begrüßen, allerdings ist die Verwendung der unterschiedlichen Modelle und der damit verbundenen Modellphilosophie sehr teuer, da viele Instrumente Spezialanfertigungen sind. Aufgrund dieser Tatsache sowie durch stetig sinkende Fördermittel, sind Universitäten und Forschungseinrichtungen dazu übergegangen, qualifizierte, aber teure Komponenten zunehmend durch COTS-Komponenten zu ersetzen.

COTS-Komponenten sind kommerziell erwerbliche Hardwareelemente, die prinzipiell die gleichen Funktionen wie Raumfahrtkomponenten aufweisen, allerdings nicht deren Qualifikationsstatus besitzen. Aufgrund der fehlenden Raumfahrtqualifikation sind die COTS-Bauteile kostengünstiger in der Beschaffung und meistens auf einem aktuelleren Stand der Technik, was bei qualifizierten Komponenten durch die Dauer der Qualifikationsprozesse nicht immer der Fall ist. Durch die Verwendung von COTS-Komponenten konnten in den letzten Jahren die Kosten für Entwicklungen bereits gesenkt werden, da nun nur noch die fertigen Flugmusterkomponenten voll qualifiziert werden mussten, anstatt alle Modellstufen einzeln zu qualifizieren. Dennoch, da die Zuverlässigkeit von COTS-Komponenten nicht mit der von voll qualifizierten Raumfahrtkomponenten zu vergleichen ist, werden noch immer, vor allem bei Missionen, bei denen mit neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen zu rechnen ist, hochwertigere Komponenten gewählt.

Da es sowohl in der Forschung als auch in der Entwicklung Bestrebungen gibt, die entstehenden Kosten weiter zu senken, um die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, konnten modulare Systeme, unabhängig davon, ob es zum Beispiel Satellitenbusse, Instrumente oder wiederverwendbare Softwarelösungen sind, in den letzten Jahren immer mehr das Interesse wecken. An dieser Stelle könnten Einplatinencomputer beginnen eine Rolle zu spielen, da sie eine kleine, leichte und vor allem kosteneffiziente Alternative zu bestehenden Elektroniken darstellen könnten. Die Einplatinencomputer sind durch die Vielzahl an Anschlussmöglichkeiten dazu in der Lage, auch komplexe Aufgaben zu steuern und auszuführen. Allerdings sind Einplatinencomputer nicht für den Einsatzbereich Weltraum entwickelt worden, was ein Nachteil ist. Bis es soweit ist, dass Einplatinencomputer wirklich für die geplanten Aufgaben in Frage kommen können, bedarf es einer Reihe von Tests, wobei sich diese Masterarbeit auf die Untersuchung auf Vakuumtauglichkeit beschränkt. Bis es jedoch ausreichend Qualifikationsvorgänge gegeben hat, kann man die Einplatinencomputer nutzen, um damit die unterschiedlichen Modelle eines Instrumentes auszurüsten und zu verifizieren, sofern die eigentliche Elektronik des Instruments aufgrund bereits erfolgter Raumfahrteinsätze nicht ebenfalls Teil des Qualifizierungsprozesses sein muss. Dies würde bereits die Kosten erheblich senken, da nur noch eine Flugmuster Elektronik gebaut werden muss.

Sollte es in der Zukunft dazu kommen, dass eine vollständige Qualifikation der Einplatinencomputer für Raumfahrtanwendungen erfolgreich abgeschlossen werden kann, dann könnte die gesamte Entwicklung auf Basis der Einplatinencomputer erfolgen. Dabei würden jedoch die meisten Nachteile der Einplatinencomputer, wie zum Beispiel ein höherer Energieverbrauch, das größere Volumen und die Masse der Platine im Vergleich zu speziell für die Anwendung entwickelten Elektronik, bestehen bleiben. Somit ist die Entscheidung für oder gegen Einplatinencomputer eine Kosten-Nutzen-Analyse.

4.2 Vakuumtests des Raspberry Pi

Für die vorliegende Masterarbeit galt es zu überprüfen, ob der gewählte Einplatinencomputer Raspberry Pi den Anforderungen des Vakuums standhält und wie sich die Platinentemperatur während verschiedener Betriebsmodi entwickelt. Dazu wurden mehrere Versuche in einer Vakuumkammer unternommen, um qualitative Aussagen über das Verhalten des Raspberry Pi treffen zu können.

Die verwendete Vakuumkammer PEL am DLR in Berlin-Adlershof, ist eine speziell für Hochtemperaturen entwickelte Vakuumkammer zur Beobachtung und spektralen Analyse von Materialien. Dazu wird eine Probentasse mit einem zu untersuchenden Material, zum Beispiel Basalt oder Gesteinspulver, auf einem Keramikkarussell positioniert und in Position über eine Induktionsspule gefahren. Nach dem Erreichen des Vakuums, ca. 0,1 bis 0,3 Millibar, wird die Probe mittels Induktion bis auf eine gewünschte Temperatur erhitzt, je nach Material und Anforderung bis zu maximal 1000 Grad Celsius. Auf diese Weise können Venus ähnliche Oberflächentemperaturen simuliert und die Probenmaterialien auf ihre Strahlungseigenschaften hin untersucht werden. Dazu wird die, durch das Material abgegebene, Strahlung über einen Spiegel in ein angeschlossenes Spektrometer geleitet und dort ausgewertet. Ziel der Forschungen ist es, eine Datenbank mit Emissivitätswerten unterschiedlicher Basalte und Gesteinsproben bei Hochtemperaturen aufzubauen, um künftige Messdaten von VEM mit diesen Daten vergleichen und die Oberflächenzusammensetzung der Venus analysieren zu können.

Bei der Entwicklung der Kammer wurde entschieden, dass für die geplanten Untersuchungen auf Planeten kein Ultrahochvakuum notwendig, sondern ein Feinvakuum ausreichend ist (Dörr, 2011). Da das VEM Entwicklungsmodell an dieser Kammer genutzt werden soll, wurden die Vakuumtests in diesem Feinvakuum durchgeführt.

Die Tests umfassten die folgenden Schritte:

1. Ein Vakuumtest bei $2,1 \cdot 10^{-1}$ mBar mit nicht betriebem Raspberry Pi mit anschließendem Funktionstest
2. Ein Vakuumtest bei $2,1 \cdot 10^{-1}$ mBar mit dem Raspberry Pi im Standby Modus und Temperaturüberwachung
3. Ein Vakuumtest bei $2,1 \cdot 10^{-1}$ mBar mit dem Raspberry Pi im Videostreaming Modus und Temperaturüberwachung

Die Tests, deren Durchführung, sowie Ergebnisse werden im Folgenden näher erläutert.

4.2.1 Offline Modus

Der erste Test war darauf ausgelegt zu prüfen, ob die auf dem Raspberry Pi befindlichen Elektronikbauteile dem Vakuum standhalten können, da seitens der Hersteller keine vollständige Bauteilliste verfügbar ist und die Bauteile somit nicht vorher auf ihre Vakuumtauglichkeit geprüft werden konnten. Aufgrund der Tatsache, dass Elektrolytkondensatoren im Vakuum platzen können, musste im ersten Schritt sichergestellt werden, dass die Platine keinen Schaden nimmt und auch noch volle Funktionalität nach dem Test aufweist. Der Einbau der Platine, genauso wie bei den folgenden Tests, beschränkte sich auf die Positionierung des Raspberry Pi auf der Keramikplatte des Probenkarussells der PEL (siehe Abbildung 5). Da diese elektrisch isoliert ist, konnte das Raspberry Pi direkt auf der Oberfläche aufliegen.

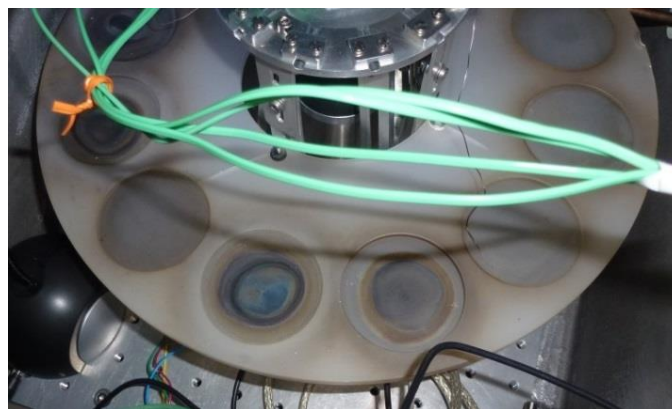


Abbildung 5: Probenkarussell der PEL

Für den Test wurde der folgende Testplan ausgearbeitet:

1. Funktionstest des Raspberry Pi durch Aufnahme eines Testbildes
2. Einbau des Raspberry Pi in die PEL
3. Evakuieren der PEL
4. Halten des Vakuums für eine halbe Stunde
5. Belüften der PEL
6. Ausbau des Raspberry Pi aus der PEL
7. Funktionstest des Raspberry Pi durch Aufnahme eines Testbildes

Das Ergebnis dieses Tests war eine voll funktionsfähige Platine, bei der keine äußeren Schäden festgestellt worden sind. Weiterhin wurden keine Verluste bei der Qualität des Bildes festgestellt, sodass dieser Test erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Somit kann geschlossen werden, dass das Raspberry Pi für das Feinvakuum geeignet ist. Auch die sich anschließenden Tests zeigten dahingehend keine abweichenden Resultate.

4.2.2 Standby Modus

Der zweite Test konnte direkt im Anschluss an den ersten Test durchgeführt werden, da zum Betreiben des Raspberry Pi nur eine stabile 5 Volt Versorgung über einen USB Mikrostecker notwendig ist. Da für die PEL, zur Überwachung der Experimente durch eine USB-Kamera, bereits ein USB-Switch im Inneren der PEL installiert worden ist, konnte die Versorgung entsprechend sichergestellt werden. Der zur Steuerung des Raspberry Pi notwendige Ethernetanschluss konnte einfach nachgerüstet werden.

Die Temperatur wurde durch zwei Arten von Sensoriken überwacht, die interne Temperaturmessung des Raspberry Pi und eine in der Kammer befindliche Messsensorik. Die Messsensorik bestand dabei aus Temperaturfühlern und wurde an einen extern liegenden Rechner angeschlossen, auf dessen Bildschirm in Echtzeit die Temperaturverläufe angezeigt und abgespeichert werden konnten. Diese Sensoren werden normalerweise bei den Hochtemperaturversuchen genutzt und sind während der Tests der IR-Kamera zur Überwachung der Probertemperaturen eingesetzt worden.

Die Temperatur des Raspberry Pi wurde durch drei Sensoren erfasst (siehe Abbildung 6).

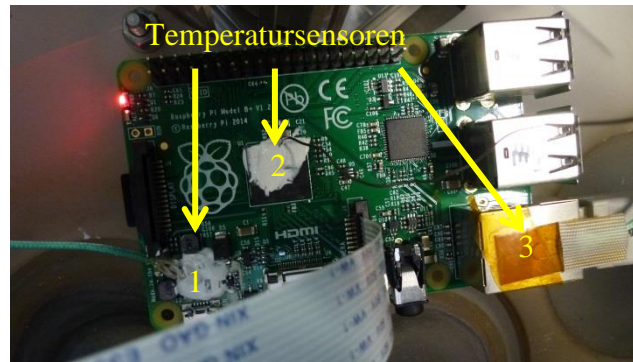


Abbildung 6: Befestigungspunkte der Temperatursensoren beim Vakuumtest des Raspberry Pi

Die Temperatursensoren befinden sich auf der Power Control Unit (siehe Abbildung 6, 1), dem Prozessor (siehe Abbildung 6, 2) und auf dem Ethernetport (siehe Abbildung 6, 3). Der Ethernetport wurde als Referenz für die Wärmeleitung in der Platine gewählt. Die Wärmeleitpaste unter den Temperatursensoren wurde für eine bessere Wärmeübertragung eingesetzt.

Der Versuchsablauf war wie folgt:

1. Funktionstest des Raspberry Pi durch Aufnahme eines Testbildes
2. Einbau der Platine in die PEL
3. Evakuieren der PEL
4. Einschalten der Stromversorgung des Raspberry Pi
5. Funktionstest des Raspberry Pi durch Aufnahme eines Testbildes
6. Halten des Vakuums während des Tests im Standby Modus
7. Funktionstest des Raspberry Pi durch Aufnahme eines Testbildes

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Temperatur des Raspberry Pi im Vakuum. Dazu wurde nur die Stromversorgung angeschlossen und ein Testfoto aufgenommen. Anschließend wurde die Temperaturentwicklung überwacht und aufgezeichnet.

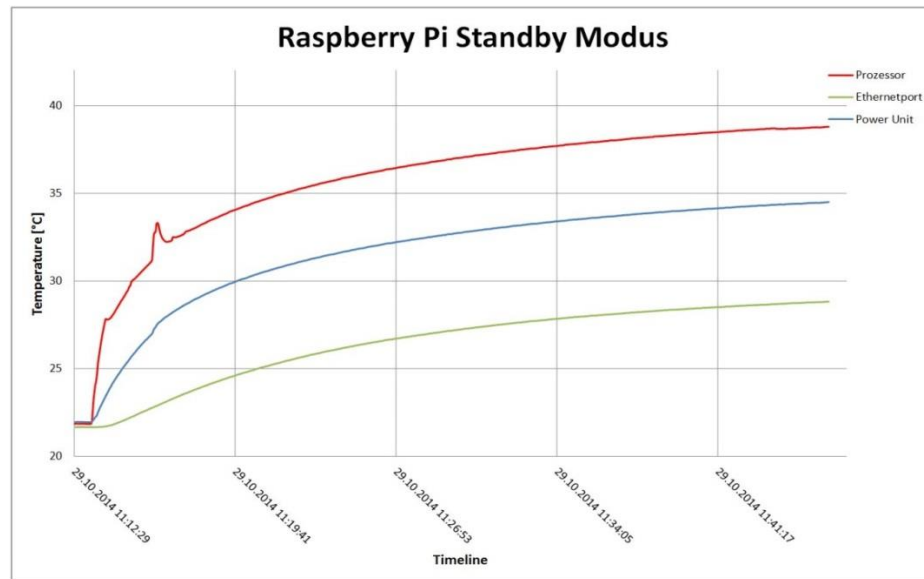


Abbildung 7: Temperaturverlauf des Raspberry Pi im Standby Modus

Die Anfangstemperatur entspricht der Umgebungstemperatur von 22°C. Der konstante Verlauf zu Beginn des Versuchs zeigt die Wartezeit, während die Kammer evakuiert worden ist. Der Einschaltvorgang und das Testfoto können ebenfalls sehr gut anhand der kleinen Temperaturerhöhungen des Prozessors nachvollzogen werden. Der Temperaturverlauf zeigt ein asymptotisches Verhalten mit einer Maximaltemperatur des Prozessors von ca. 40°C. Aufgrund der schlechteren Wärmeabfuhr im Vakuum, bedingt durch den fast vollständigen Wegfall des Wärmeaustausches mit der Luft über Wärmestrahlung, konnte also ein deutlicher Anstieg der Platinentemperatur beobachtet werden. Der stetige Anstieg der Temperatur bis in kritische Bereiche von ca. 80°C, dem hardwareseitigen Maximalwert für einzelne Komponententeile (Adams, 2014), wurde jedoch nicht beobachtet.

4.2.3 Videostreaming Modus

Nachdem die vorangegangenen Tests gezeigt hatten, dass das Raspberry Pi im Vakuum funktionsfähig bleibt und sich auch die Temperatur im Standby Modus asymptotisch verhält, wurde im nächsten Schritt das Raspberry Pi unter Last beobachtet, das heißt es wurde ein halbstündiger Videostream via Ethernet an einen extern liegenden Computer gesendet. Das Video lief im High Definition Format 1920 x 1080 mit der Codierung H.264, sodass die Rechenleistung des Raspberry Pi entsprechend höher lag als im Standby Modus. Da der Test direkt im Anschluss an den Test im Standby Modus durchgeführt worden ist, war der Ablauf wie folgt:

1. Funktionstest des Raspberry Pi durch Aufnahme eines Testbildes
2. Halten des Vakuums während des Tests
3. Start des Videostreams
4. Ende des Videostreams
5. Funktionstest des Raspberry Pi durch Aufnahme eines Testbildes
6. Belüften der PEL
7. Ausbau der Platine aus der PEL
8. Funktionstest des Raspberry Pi durch Aufnahme eines Testbildes

Der Temperaturverlauf dieses Videostreamingtests ist in Abbildung 8 zu sehen.

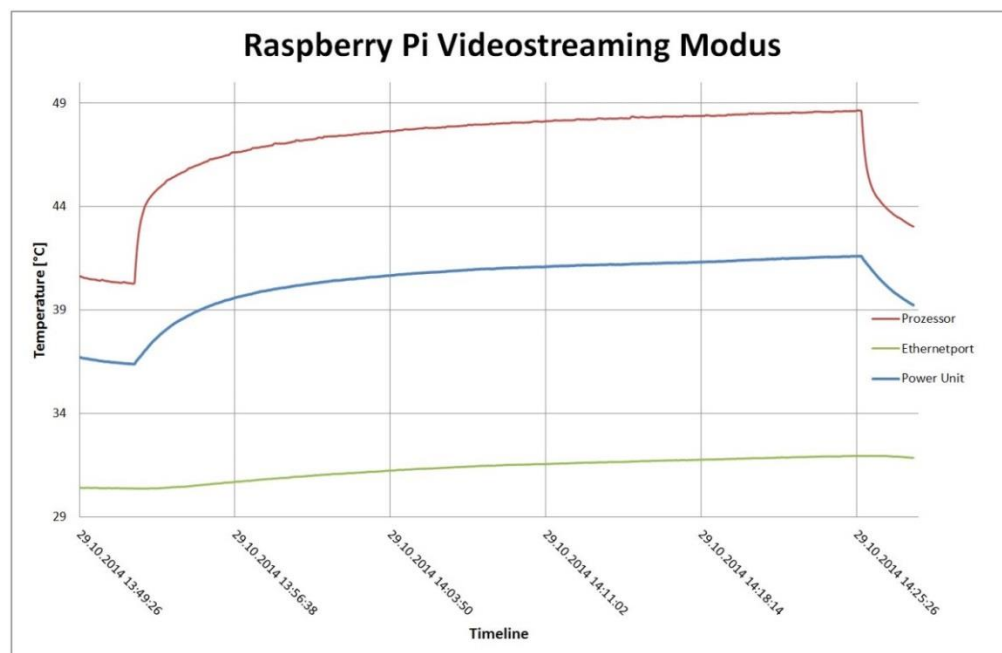


Abbildung 8: Temperaturverlauf des Raspberry Pi im Videostreaming Modus

Der Verlauf zeigt zu Beginn einen Temperaturabfall, da vor Beginn der eigentlichen Verbindung ein Testlauf des Streamings durchgeführt worden ist. Nach einer kurzen Abkühlphase, die durch den fallenden Verlauf dargestellt wird, wurde der Stream gestartet. Auch hier ist wieder ein asymptotischer Temperaturverlauf zu erkennen, wobei der Maximalwert von 80°C erneut nicht erreicht wird. Allerdings kann man anhand des Temperaturverlaufs des Ethernetports feststellen, dass die Temperatur des Raspberry Pi insgesamt durch Wärmeleitung steigt. Der Abkühlvorgang nach Deaktivierung des Streams ist ebenfalls gut erkennbar.

4.3 Messung der Temperaturen

Die Problematik der Temperaturmessung nur mit Hilfe der internen Sensoren des Raspberry Pi wurde dadurch deutlich, dass die automatischen Programmaufrufe, die sogenannten Cron-Jobs, nur maximal einmal pro Minute ausgeführt werden können, sodass der Temperaturverlauf nur unzureichend überwacht werden kann. Das verwendete Programm war ein einfaches Batchscript, was die internen Temperatursensoren des Raspberry Pi genutzt hat, um die Temperatur zu überwachen. Als Ergebnis dieser Problematik wurde entschieden, eine externe Temperaturmessung für das Entwicklungsmodell zu nutzen (siehe Kapitel 5.1.5).

Während der Tests mit dem Raspberry Pi im Vakuum konnten externe Sensoren genutzt werden, die als Typ jedoch nicht für einen nominellen Betrieb in Frage kommen. Daher wurde entschieden, die in Kapitel 5.1.5 vorgestellten Temperatursensoren zu nutzen. Sie sollen die Temperaturen an mehreren Stellen innerhalb des Entwicklungsmodells überwachen, um so möglichst genau das thermische Verhalten der optischen Bauteile, der Elektronik sowie der Struktur erfassen zu können. Dies sollte es ermöglichen, den Temperaturverlauf innerhalb der Kamera zu verstehen und gegebenenfalls besser auf Temperaturschwankungen zu reagieren. Die genauen Messpunkte sind in Kapitel 7.1 genannt. Die Software zur Steuerung der Temperatursensoren wird in Kapitel 6.3 erläutert.

4.4 Auswertung der Raspberry Pi Tests im Vakuum

Wie bereits in den jeweiligen Tests erläutert, war der Temperaturanstieg nicht so hoch wie erwartet. Somit kann geschlossen werden, dass das Raspberry Pi im Vakuum betrieben werden kann. Allerdings gibt es Randbedingungen, die die Testergebnisse beeinflusst haben, die im Folgenden erläutert werden.

Der beobachtete Temperaturabfall (siehe Abbildung 9) war nach dem Ausschalten des Streams insofern interessant, als dass die Temperatur des Prozessors um sechs Grad in 12 Minuten gefallen ist.

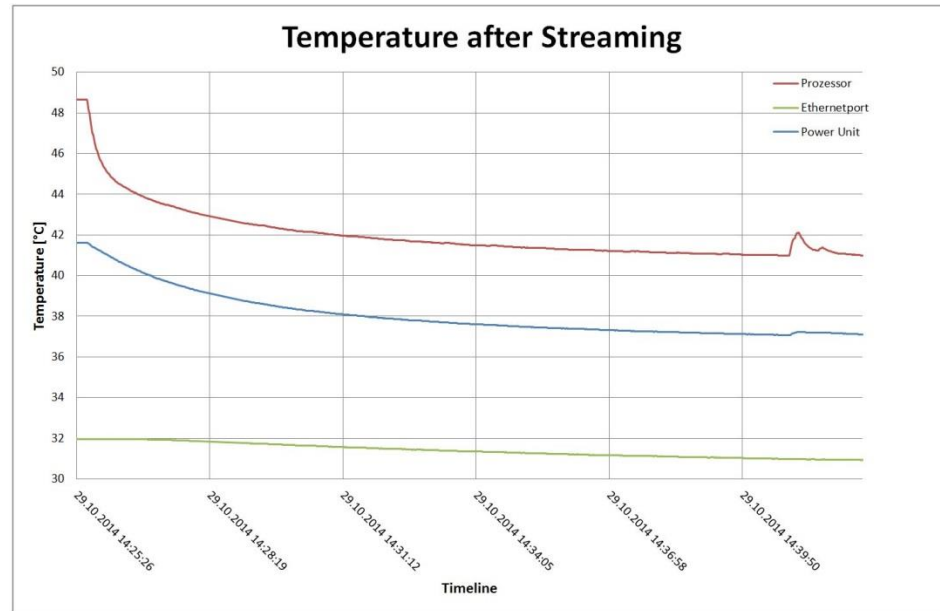


Abbildung 9: Temperaturverlauf des Raspberry Pi nach dem Videostreaming Modus

Eine weitere Begründung für diesen Temperaturabfall, neben dem Absinken der Rechenleistung des Boards, ist die Wärmeableitung über die Kontaktpunkte der Platine zum Probenkarussell, welches während der Tests bei etwa 21°C geblieben ist. Obwohl die Auflagefläche der Platine auf der Oberfläche des Karussells nicht sehr groß ist, bedingt durch die Pins und Lötunkte auf der Unterseite des Boards, wird über diese Kontaktpunkte ein Großteil der Wärme abgeführt.

Als Schlussfolgerung dieser Tests für den Entwurf des VEM Entwicklungsmodells dieser Masterarbeit gilt, dass der Einplatinencomputer Raspberry Pi für einen Vakumeinsatz geeignet ist und demnach auch als Instrumentenkontroller für Nanosatelliten oder auch für Suborbitalflüge eingesetzt werden kann. Weiterhin konnte durch die Tests herausgefunden werden, dass über Wärmeleitung die anfallende Wärme effizient abtransportiert werden kann. Das Raspberry Pi sollte demnach gut über die Anschraubpunkte und über zusätzliche Kühlfinger an den Wärmequellen mit der Struktur der zu entwickelnden IR-Kamera verbunden und so passiv gekühlt werden. Um eine Überhitzung des Raspberry Pi zu vermeiden, sollte darauf geachtet werden, dass die Struktur des Entwicklungsmodells mindestens bei Zimmertemperatur bleibt. Sollte dies nicht der Fall sein, kann es eventuell zu einer Beschädigung des Raspberry Pi kommen.

5 Design des Entwicklungsmodells

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Design des durch diese Masterarbeit zu erstellenden Entwicklungsmodells der VEM Kamera und der Auswahl der dafür benötigten Komponenten. Es werden auch die Gründe für die Komponentenauswahl erläutert.

Das Design des Entwicklungsmodells ist größtenteils durch den im Projektantrag bereits beschriebenen Optikaufbau der VEM Kamera festgelegt (Naderi et al, 2015). Allerdings werden, aufgrund der in Kapitel 3.2 genannten Vereinfachungen, konstruktive Änderungen vorgenommen und auch Komponenten neu positioniert und verwendet. Der schematische Aufbau der Kamera ist, in der Testkonfiguration, in Abbildung 10 dargestellt. Weiterhin ist der Strahlengang der Kamera abgebildet.

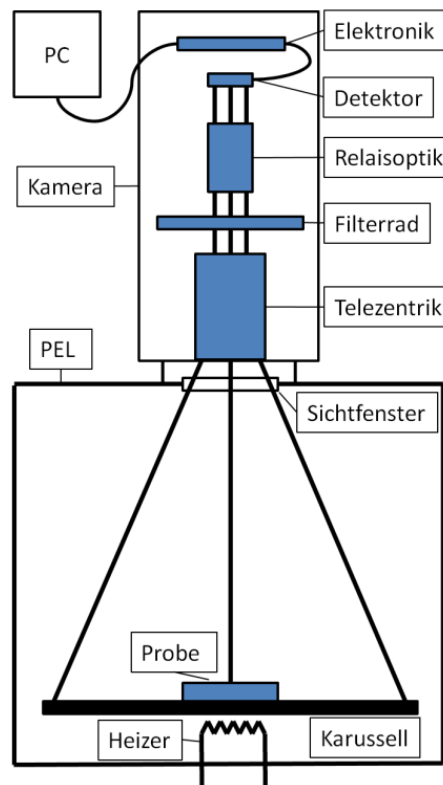


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Kameraaufbaus in der Testkonfiguration

5.1 Komponentenauswahl

Aufgrund der Tatsache, dass das Entwicklungsmodell aus mehreren unterschiedlichen Komponentengruppen entsteht, werden diese im Folgenden einzeln erläutert, um die Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen zu erhöhen.

5.1.1 Telezentrik

Die Optik von VEM ist strukturell einfach aufgebaut, da sie aus einer Telezentrik, einer Filterebene und einer Relaisoptik besteht. Diese bilden das Bild auf den CMOS-Sensor (siehe Kapitel 5.1.4) ab, von dem dann das Bild über die Elektronik abgefragt und an den Rechner gesendet wird.

Telezentriken sind spezielle Linsensysteme, deren Aufgabe es ist, Strahlengänge zu parallelisieren. Es gibt drei Varianten, wie die Strahlengänge durch Telezentriken manipuliert werden können. Die Telezentrik kann entweder eine

- objektseitige Telezentrik,
- bildseitige Telezentrik oder
- beidseitige Telezentrik

sein. Jede der drei Möglichkeiten hat ihre spezifischen Einsatzszenarien, die genutzt werden können.

Objektseitige Telezentriken werden besonders häufig in der Industrie genutzt. Die objektseitige Telezentrik nimmt nur parallele Strahlengänge in Größe der Apertur der Telezentrik auf. Schräg eintreffende Lichtstrahlen werden von der objektseitigen Telezentrik nicht mit berücksichtigt. Der Strahlengang hinter der Telezentrik ist nicht mehr parallel, sondern fächert sich auf. Sie wird hauptsächlich zur Überprüfung von planen Oberflächen maschinell gefertigter Komponenten genutzt, da die sonst üblichen Verzeichnungen im Bild entfallen. (Brieß, Detektoren, 2015) Abbildung 11 stellt vereinfacht den Strahlengang einer objektseitigen Telezentrik dar.

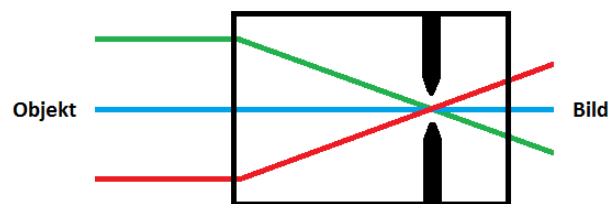


Abbildung 11: Vereinfachtes Schema einer objektseitigen Telezentrik

Der Strahlengang der bildseitigen Telezentrik, schematisch in Abbildung 12 dargestellt, bildet das genaue Gegenstück dazu, da hierbei die Lichtstrahlen des Objektes auch unter einem Winkel

in die Telezentrik einfallen können, wodurch ein deutlich größerer Objektbereich als die Apertur betrachtet werden kann. Die Strahlen hinter der Telezentrik werden dann parallelisiert.

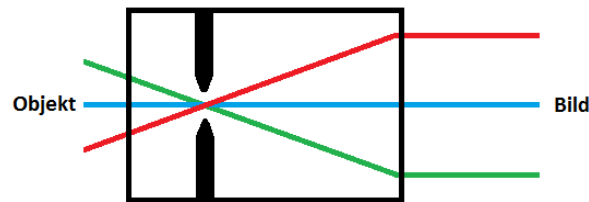


Abbildung 12: Vereinfachtes Schema einer bildseitigen Telezentrik

Diese Art von Telezentriken wird hauptsächlich bei Digitalkameras benötigt, da die verwendeten CMOS-Sensoren einen möglichst parallelen Lichteinfall benötigen. Dies resultiert aus dem Aufbau der CMOS-Sensoren, die über dem eigentlichen Sensorfeld noch jeweils eine kleine Linse besitzen. Der Grund für die eher geringe Anzahl an kommerziell verfügbaren bildseitigen Telezentriken, im Gegensatz zu den beiden anderen Typen, liegt in der Tatsache, dass der Großteil der Kameras CCD-Sensoren nutzt bzw. die notwendigen optischen Korrekturen durch bildseitige Telezentriken aufgrund der hohen Kosten zumeist entfallen. Für diese Masterarbeit wird jedoch genau diese Art von Telezentrik benötigt, sodass die Suche sich entsprechend aufwendig gestaltete.

Die dritte Variante, eine beidseitige Telezentrik, besitzt den parallelen Strahlengang vor und hinter der Telezentrik. Diese Bauform ist noch häufiger in der Industrie in Verwendung als die objektseitige Telezentrik, da eine einfachere Anbindung an weitere Optikkomponenten möglich ist und die Bildfehler geringer sind. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 13 dargestellt.

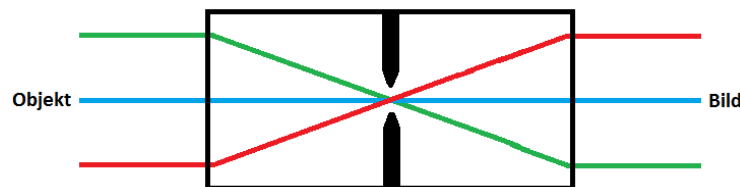


Abbildung 13: Vereinfachtes Schema einer beidseitigen Telezentrik

Die notwendige Herstellungsgenauigkeit, die für eine Telezentrik benötigt wird, kann nur mit Spezialinstrumenten erreicht werden, die für diese Masterarbeit nicht verfügbar sind. Aufgrund dessen wurde für die Optikbauteile entschieden, Kaufteile zu verwenden. Die Kaufteile, die prinzipiell einfache Linsensysteme sind, bestehend aus einzelnen Linsen, können auch selbst

aufgebaut werden, doch die optischen Fehler, die durch fehlerhaften Aufbau und Ausrichtung der Linsen zueinander entstehen können, würden den Nutzen reduzieren. Aufgrund dieser Nachteile sowie der genannten Herstellungsgenauigkeit wurde entschieden, auf Kaufteile auszuweichen.

Wie bereits erläutert kommen für diese Arbeit aufgrund des für VEM geplanten Optikkonzepts nur bildseitige Telezentriken in Frage. Es gibt zwar sehr viele Hersteller, die Telezentriken produzieren, zum Beispiel Edmund Optics, Opto Engineering oder Sill Optics, doch die meisten Telezentriken sind beidseitig telezentrisch. Die Auswahl an bildseitigen Telezentriken war bereits begrenzt bzw. musste zusätzlich aufgrund der in Kapitel 3.2 genannten Anforderungen beschränkt werden. Tabelle 2 zeigt die Entscheidungsmatrix mit drei möglichen bildseitigen Telezentriken sowie der Bewertung derselben in mehreren Kategorien.

Tabelle 2: Entscheidungsmatrix der Telezentriken

	GOYO OPTICAL Inc., CVO C-Mount Objektiv (Goyo Optical Inc., 2015)	Schneider Kreuznach, KMP APO-XENOPLAN 20 (Schneider Kreuznach, 2015)	IB/E Optics, Low Shading Objektive (IBE Optics, 2015)
Baugröße	o (48 x 73,5 mm)	+ (48 x 62,9 mm)	- (k. A.)
Masse	+ (285 Gramm)	o (450 Gramm)	- (k. A.)
Bildfelddurchmesser	+ (11 mm)	o (24 mm)	- (k. A.)
Öffnungswinkel	+ (27,1°)	o (k. A.)	o (k. A.)
Lieferdauer	o (6 Wochen)	+ (ca. 4 Wochen)	- (Entwicklung ausstehend)
Preis	+ (ca. 800 €)	- (ca. 2200 €)	o (k. A.)
Ergebnis (Punkte)	4	1	-4

Die Entscheidung zugunsten des Goyo Optical Inc. Objektivs wurde hauptsächlich durch den Preis motiviert, da die anderen Kriterien nur leicht bessere Werte im Vergleich zum Schneider Kreuznach Objektiv aufwiesen. Da der Preis jedoch mehr als doppelt so hoch lag, wurde die etwas längere Lieferzeit als weniger kritisch eingestuft und verstärkt der Ansatz einer möglichst kosteneffizienten Entwicklung des Modells verfolgt.

Die Parameter der gewählten Telezentrik können der Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Parameter der verwendeten Telezentrik (Goyo Optical Inc., 2015)

Parameter	Wert
Brennweite	18 mm
Blende	F 1,4 bis geschlossen
Baugröße (D x L)	48 x 73,5 mm
Anschluss	C-Mount
Masse	285 g
Field of View	27,1° x 21°
Objektabstand	< 135 mm

Das entstehende Bild der Telezentrik hat einen Durchmesser von ca. 11 Millimetern und kann direkt durch den Anschluss einer Kamera an den C-Mount-Anschluss weiterverarbeitet werden.

5.1.2 Relaisoptik

Die Relaisoptik leitet Strahlen von Fokuspunkt A zu Fokuspunkt A' weiter. Auch hierbei ist der Aufbau des Linsensystems einfach aus einzelnen Linsen nachzubauen, doch wie auch bei den telezentrischen Optiken kann im Rahmen der Masterarbeit mit den vorhandenen Hilfsmitteln keine qualitativ hochwertige Optik erzeugt werden, sodass ebenfalls entschieden worden ist, Kaufteile zu verwenden. Die Funktionsweise einer Relaisoptik ist in Abbildung 14 schematisch dargestellt.

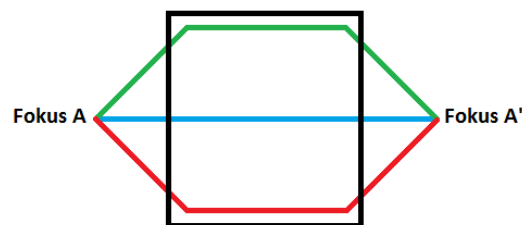


Abbildung 14: Vereinfachtes Schema einer Relaisoptik

Es gibt unterschiedliche Typen von Relaisoptiken, die passend zur Aufgabe erworben werden können. Für die Masterarbeit ist es von Vorteil, eine möglichst kompakte und mit kurzer Brennweite ausgestattete Optik zu verwenden. Weiterhin muss die Relaisoptik das Bild minimieren, damit das Bild mit 11 Millimetern Durchmesser, das von der Telezentrik bereitgestellt wird, auf die Sensorgröße der Kamera reduziert wird. Dazu wurden mehrere Relaisoptiken untersucht und in Tabelle 4 gelistet.

Tabelle 4: Entscheidungsmatrix der Relaisoptiken

	Edmund Optics, 30mm NIR Achromat Pair (35/60) (Edmund Optics, 2015a)	Edmund Optics, 30mm NIR Achromat Pair (35/75) (Edmund Optics, 2015b)	Thorlabs, MAP1050100-B (Thorlabs, 2015)
Baugröße	+ (30 x 34 mm)	+ (30 x 34 mm)	- (30,5 x 38,7 mm)
Vergrößerung	+ (1 : 1,71)	- (1 : 2,14)	o (1 : 2)
Brennweite	+ (35 / 60 mm)	o (35 / 75 mm)	- (50 / 100 mm)
Lieferzeit	- (1 Woche)	+ (2 - 3 Tage)	+ (2 - 3 Tage)
Preis	- (251 €)	- (251 €)	+ (151 €)
Ergebnis	1	0	0

Aufgrund der Auswertungsmatrix ist die erste Relaisoptik von Edmund Optics (Achromat Pair 35/60) für die geforderte Aufgabe am besten geeignet. Die ausgewählte Relaisoptik hatte jedoch nach Bestellung mehrere Wochen Lieferschwierigkeiten, sodass die zweite Relaisoptik (Achromat Pair 35/75) genommen werden musste, was zu einer größeren Bauform der Struktur des Entwicklungsmodells führte. Die Parameter der verwendeten Relaisoptik befinden sich in Tabelle 5.

Tabelle 5: Parameter der verwendeten Relaisoptik (Edmund Optics, 2015b)

Parameter	Wert
Baugröße (D x L)	30 x 34 mm
Brennweite A	35 mm
Brennweite A'	75 mm
Bildweite	64,24 mm
Objektabstand	25 mm
Vergrößerung	1 : 2,14
Transmissionsbereich	0,75 – 1,55 μm

5.1.3 Filter

Die Verwendung von Filtern ist, wie bereits in Kapitel 3.2.1 erläutert, auf eine kleinere Anzahl an Spektralkanälen beschränkt worden. Von den ursprünglich 14 für VEM geplanten Kanälen werden in dieser Masterarbeit nur drei als Demonstratoren verwendet. Die ausgewählten Zielwellenlängen sind dabei 850, 900 und 1020 Nanometer. Dabei ist darauf zu achten, dass bei

der Wahl der Filter möglichst genau die Wellenlänge getroffen wird, um die Vergleichbarkeit zu VEM zu erhalten. Daraus folgt für diese Masterarbeit, dass nur Infrarotbandpassfilter in Frage kommen, da diese über das betrachtete Spektrum andere Wellenlängen abblocken können. Außerdem sollten hohe Transmissionsraten der Filter vorliegen, da die Energie der Strahlung in diesem Spektrum sehr gering ist (vgl. Kapitel 1.3).

Bandpassfilter sind Filter, die nur für eine bestimmte Wellenlänge durchlässig sind. Dazu wird ein Substrat oder Glas entsprechend behandelt, um nur diese Wellenlänge passieren zu lassen. Da dies jedoch nur für ideale Filter gilt, gibt es eine Zentralwellenlänge, die der gewünschten Wellenlänge entspricht. Die angrenzenden Wellenlängen werden mit einer Gauß'schen Verteilung, Halbwertbreite genannt, ebenfalls transmittiert, jedoch in geringerem Maß.

Im Zuge der Recherche nach geeigneten Filtern stellte sich heraus, dass es für den kommerziellen Bereich eine Vielzahl an Filterherstellern und Filtertypen gibt, jedoch die Zielwellenlängen entweder nicht verfügbar oder Sonderanfertigungen sind. Aufgrund dessen wurde in Absprache mit dem Betreuer Jörn Helbert sowie dem Venusexperten Nils Müller entschieden, dass Bandpassfilter, die zwar kleine Abweichungen zu den Designwellenlängen aufweisen, jedoch als Kaufteil sofort verfügbar sind, bevorzugt verwendet werden sollen. Die Aussagekraft der Arbeit wird dadurch nicht negativ beeinflusst, da die auf der Venus vorhandenen atmosphärischen Fenster ebenfalls gewisse spektrale Breiten haben. Ergebnis der neuen Randbedingungen waren Filter der Wellenlängen 850, 905 und 1000 Nanometer. Da die Halbwertbreite der Filter in den meisten Fällen ungefähr zehn Nanometer beträgt, wäre nur der 1020 Nanometer Filter nicht durch die neue Konfiguration abgedeckt, doch in der geplanten VEM-Konfiguration gibt es auch Filter, die in diesem Bereich operieren.

Die drei ausgewählten Filter in Tabelle 6 stammen von der Firma Edmund Optics. Neben den bereits gewonnenen, guten Erfahrungen des DLR mit den Produkten dieser Firma, konnten die gewählten Filter vor allem durch ihre für diese Masterarbeit geeigneten Parameter überzeugen.

Tabelle 6: Parameter der verwendeten Filter

	Edmund Optics, 850nm Bandpassfilter (Edmund Optics, 2015c)	Edmund Optics, 905nm Bandpassfilter (Edmund Optics, 2015d)	Edmund Optics, 1000nm Bandpassfilter (Edmund Optics, 2015e)
Zentralwellenlänge [nm]	850	905	1000
Halbwertbreite [nm]	10	10	10
Minimale Transmission [%]	≥ 85	≥ 85	> 70
Blockungsbereich [nm]	200 – 1200	200 – 1200	200 – 1200

Die vorliegenden Filter wurden nach Eingang durch ein Spektrometer auf ihre Transmission hin vermessen, um eventuelle Fehler vor Einbau in das Entwicklungsmodell zu bemerken. Die Ergebnisse der Vermessung sind in Abbildung 15 zu sehen.

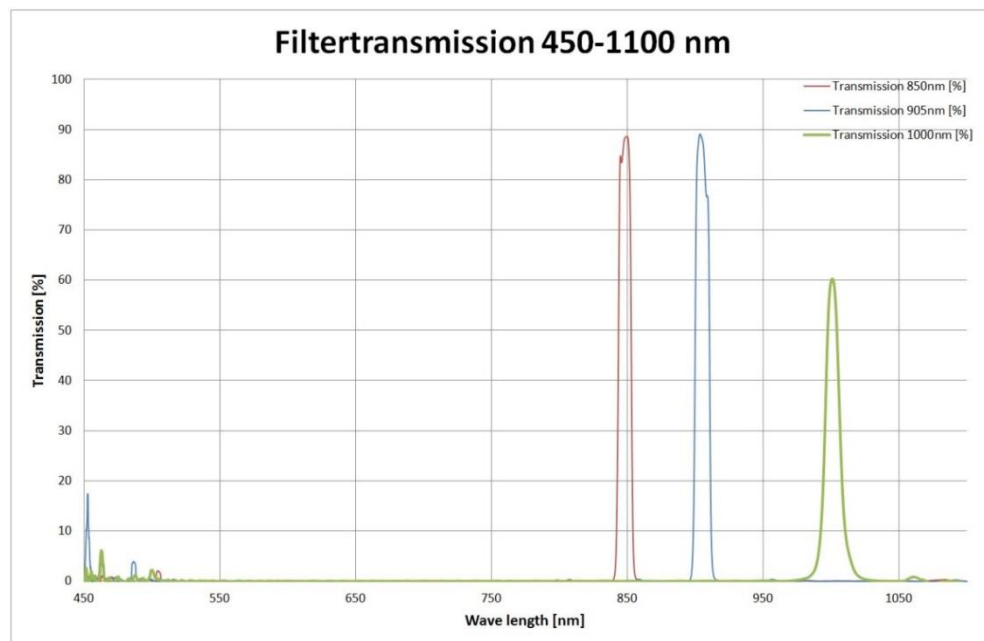


Abbildung 15: Vermessung der Filtertransmission

Wie deutlich zu erkennen ist, zeigen der 850 und 905nm Filter mit fast 90 Prozent Transmission sehr gute Transmissionswerte und ebenso ein gutes Abblockverhalten, auch wenn zwischen 450 und 500nm eine leichte Transmission stattfindet. Dies ist für diese Arbeit jedoch nicht von Belang, da die Relaisoptik (siehe Kapitel 5.1.2) dieses Spektrum wegschneidet.

Der Grund für die schlechtere Transmissionsrate des 1000nm Filters von nur 60 statt der beworbenen 70 Prozent, liegt wahrscheinlich nicht an dem Filter, sondern an dem Detektor des Spektrometers, da die Empfindlichkeit in diesem Bereich etwas schlechter ist.

5.1.4 Einplatinencomputer

Einplatinencomputer haben sich in den letzten Jahren einer immer größeren Beliebtheit erfreut. Die Überlegung hinter den Einplatinencomputern ist es, vor allem jungen Menschen den Einstieg in die Programmierung zu ermöglichen. Der Vorteil dieser Scheckkarten großen Computer liegt, neben der geringen Größe, in den vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und dem niedrigen Preis pro Stück. War es vor dem Erscheinen der Einplatinencomputer noch notwendig, für kleine Hobbyprojekte ein gutes Verständnis von Mikrocontrollern und Lötarbeiten zu haben, so ist mit deren Einführung der Einstieg in die Programmierung erleichtert worden. Durch verschiedene, erwerbbare Zusatzmodule sind die Einplatinencomputer nicht nur auf einen Standardbausatz beschränkt, sondern können modular erweitert werden.

Abbildung 16 zeigt den bekanntesten Vertreter der Einplatinencomputer, das Raspberry Pi B+.



Abbildung 16: Raspberry Pi B+

Die stetige Weiterentwicklung dieses Einplatinencomputers sowie die wachsende Anzahl neuer Zusatzmodule gaben den Ausschlag zu dessen Nutzung für diese Masterarbeit. Es gibt zahlreiche andere Produkte, die im Allgemeinen leistungsfähiger als das Raspberry Pi sind, doch für die Masterarbeit ist die Leistungsfähigkeit mehr als genügend. Als bekannteste Vertreter sind hier das Arduino (Arduino, 2015) und das Cubieboard (CubieBoard, 2015) zu nennen.

Das für die Masterarbeit interessanteste Zusatzmodul ist die Raspberry Pi Kamera oder auch RaspiCam. Dieses Modul ist eine anschließbare fünf Megapixel Kamera, die über einen eigenen

Port und eine vorinstallierte Softwareunterstützung verfügt. Die Kamera gibt es in zwei Versionen, die Standardvariante für Aufnahmen im sichtbaren Bereich und die NoIR-Variante (No-Infrared, siehe Abbildung 17), bei der der Infrarotsperfilter entfernt worden ist. Durch diese Modifikation kann der Kameradetektor sein gesamtes Spektrum bis knapp über einen Mikrometer abdecken, was für diese Arbeit benötigt ist.



Abbildung 17: Raspberry Pi Kamera NoIR

Der eigentliche Detektor des Moduls ist ein CMOS Chip der Firma OmniVision Technologies Inc., der für den Handykamerabereich entwickelt wurde. Die Parameter des Detektors können in Tabelle 7 eingesehen werden.

Tabelle 7: Parameter des verwendeten Raspberry Pi Kamera CMOS-Chips (OmniVision Technologies Inc., 2015)

Parameter	Werte
Aktive Matrixfläche (maximale Auflösung)	2592 x 1944 Pixel
Pixelgröße	1,4 x 1,4 μm
Datenausgabe	8-Bit/10-Bit Roh RGB Daten
Temperaturbereich	Nominell: -30 – 70 °C Stabiles Bild: 0 – 50 °C
Empfindlichkeit	680 mV / (Lux – Sekunde)
SNR	36 dB
Dunkelstrom	16 mV/Sekunde @ 60 °C

Wie zu erkennen ist, ist dieser CMOS-Detektor nicht für einen Kryoeinsatz entwickelt, doch eine aktive Kühlung kann die Bildqualität verbessern. Die möglichen Optimierungsansätze für Bildaufnahmen mit dieser Kamera werden in Kapitel 10 diskutiert.

5.1.5 Temperatursensoren

Es gibt eine große Anzahl an Temperatursensoren, die alle durch unterschiedliche Verfahren die Temperatur ermitteln können. Es gibt zum Beispiel Widerstandsthermometer, wobei sich ein Widerstand durch Wärme ändert und dadurch die Temperatur bestimmt werden kann oder

Halbleiter-Temperatursensoren, bei denen ein Transistor als Diode geschaltet ist und die Basis-Emitter-Spannung sich mit der Temperatur ändert. (Maxim Integrated, 2015a)

Für die Masterarbeit sind Temperatursensoren der zweiten Kategorie gewählt worden, da sie direkt ein elektrisches Signal generieren. Die Sensoren DS18B20+ der Firma Maxim Integrated (Maxim Integrated, 2015b) sind in Abbildung 18 zu sehen.

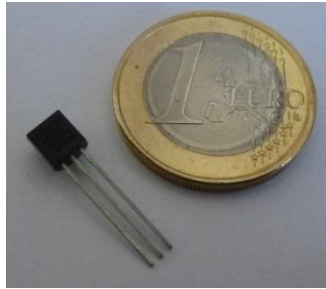


Abbildung 18: Temperatursensor DS18B20+

Eine Besonderheit bei dem gewählten Sensortyp ist, dass dieser direkt die Temperatur ausgeben kann und somit die Umrechnung von analogen auf digitale Werte entfällt. Weiterhin verfügen die Sensoren über eine praktische Ansteuerungsmöglichkeit, das 1-wire Protokoll.

Das 1-wire Protokoll verwendet eine parasitäre Stromversorgung, wodurch der Anschluss der Sensoren vereinfacht wird. Die drei Pins, GND (Ground), V_{DD} (3,3 V) und DQ (Datenleitung), zu sehen in Abbildung 19 (TO-92), werden wie folgt verkabelt:

- GND und V_{DD} werden zusammengeschaltet und auf eine Erdung geführt.
- DQ wird an die Datenleitung angeschlossen, welche über einen Pull-Up Widerstand an den Mikrocontroller geführt wird.
- Die parasitäre Stromversorgung wird durch das Anschließen eines 3,3 V-Pins der GPIO-Leiste (General Ports Input Output) des Raspberry Pi (siehe Abbildung 16) mit der Datenleitung erreicht. Die Verbindung muss über einen 4,7 k Ω Widerstand geführt werden, um Kurzschlüsse zu vermeiden, wobei der Widerstand mit steigender Anzahl der Sensoren reduziert werden muss, damit eine ausreichende Versorgung der Sensoren sichergestellt werden kann.

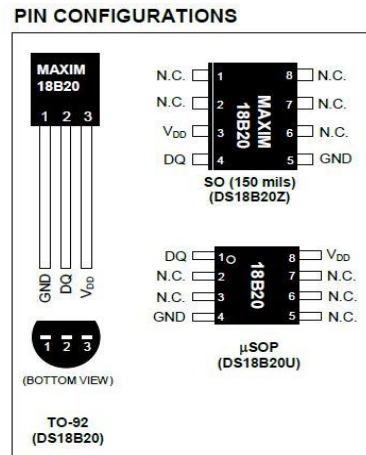


Abbildung 19: Pin Layout des Temperatursensors DS18B20+ (Maxim Integrated, 2015b)

Auf die CAD-Modellierung der Kabelführung in der Kamera wurde verzichtet, da diese erst in der fertig integrierten Kamera möglich ist, um Biegeradien und Kabelreserven zu berücksichtigen. Der Abruf der Temperaturen ist in Kapitel 6.3 beschrieben, der Einbau der Sensoren in Kapitel 7.1.

5.2 Konstruktion

Das folgende Kapitel befasst sich mit der Konstruktion der Kamera, die mit dem CAD Programm CATIA V5R21 (Dassault Systemes, 2015) entworfen wurde. Die dafür notwendigen Schritte und Herangehensweisen werden dargestellt und erläutert.

5.2.1 Gehäuse

Das Gehäuse der Kamera ist sehr einfach gehalten, wobei es mehrere Iterationsschritte gab. Es gab mehrere Anforderungen an die Struktur und Funktion des Gehäuses der Kamera, die im Folgenden erläutert werden.

Hauptaufgabe der Gehäusestruktur ist die Aufnahme der einzelnen Bestandteile der Kamera, sprich der Optik und der Elektronik. Weitere Anforderungen an die Struktur waren, neben der Stabilität und einfachen Montierbarkeit, auch eine gute thermische Wärmeabfuhr an die Umgebung sowie Lichtdichtheit und eine mögliche Verwendung der Kamera im Vakuum.

Erste Konzepte des Gehäuses sahen eine Bodenplatte mit einem Deckel vor, der durch eine Flachbanddichtung optisch isoliert werden sollte. Die Bodenplatte ist vom Prinzip her als Basis der Kamera konzipiert, das heißt, auf dieser Platte sind alle Bestandteile der Kamera montiert.

Keine andere Außenstruktur hat Anschlüsse an die innere Kamerahardware. Der Deckel sollte die eingestellte Optik und Elektronik isolieren, das einzustellende Filterrad (siehe 5.2.2) sollte durch eine Wartungsklappe im Deckel erreichbar sein.

Dieses Konzept war hinsichtlich der Anforderung an die einfache Bauweise geeignet, allerdings musste aus fertigungstechnischen Gründen dieses Konzept abgeändert werden. Im zweiten Ansatz wurde die Deckelstruktur in einzelne Wände zerlegt, wodurch eine teure Fertigung aus einem Massivblock verhindert wird. Allerdings besitzt diese Bauform Nachteile in Bezug auf die Lichtdichtheit des Systems, da nun deutlich mehr Dichtungen vorgesehen werden mussten. Als Resultat davon mussten die Außenwände von 3 auf 5 Millimeter verbreitert werden, um Bauraum für die Dichtungen zur Verfügung zu stellen. Da die Wandstärke für eine optimale Verschraubung mit planeingesenkten Schraubenköpfen sehr gering ist, wurden Würfel mit 10 mm Kantenlänge in den Ecken des Gehäuses als Lösung gewählt. Sie verbinden jeweils drei Wände miteinander und geben selbst einer dünnen Struktur die notwendige Stabilität. Abbildung 20 zeigt den Würfel.

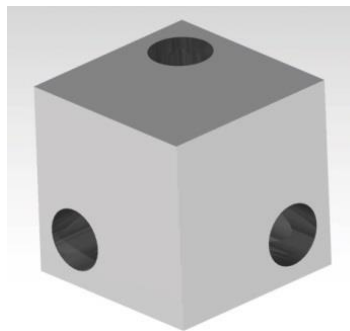


Abbildung 20: Winkelverbinder der Gehäusestruktur

Das Dichtungskonzept wurde, mit Hinsicht auf die Verschleißanfälligkeit der Dichtungen durch häufige Montage, verworfen. Stattdessen wurden einfache Lichtfallen in die Struktur integriert, deren geometrische Formen für Lichtdichtheit sorgen (siehe Abbildung 21). Infolge dessen wuchs die Strukturdicke auf acht Millimeter an. Dadurch wurde auch erreicht, dass die Schraubenköpfe zur Verschraubung der Außenwände versenkt werden konnten.

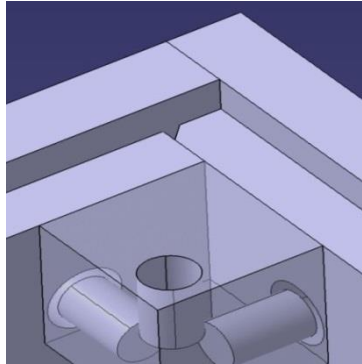


Abbildung 21: Lichtfallenkonzept der Masterarbeit exemplarisch gezeigt an einer Ecke des Gehäuses

Die nächste Modifikation des bestehenden Konzepts bezog sich auf die Verwendung der Zugriffsklappe für das Filterradd und einen Kommunikationsport. Nach Überlegungen hinsichtlich des Staubschutzes der Optik und einen möglichen Zugriff auf das Filterradd wurde die Wartungsklappe verworfen, da die Wand nochmals hätte verstärkt werden müssen. Außerdem ist die Lichtdichtheit an dieser Stelle eine zusätzliche Fehlerquelle, weswegen eine Entscheidung gegen die Wartungsklappe getroffen wurde. Der Kommunikationsport war in den bisherigen Konzepten nicht vorgesehen und wurde daher in dieser Revision hinzugefügt. Dazu wurden zwei Aussparungen in einer Gehäusewand vorgesehen, eine für den Ethernetport und eine für den USB-Port.

Der letzte Konfigurationsschritt war die Überlegung hinsichtlich der Montage der Kamera auf der PEL. Um dies zu realisieren, musste ein lichtdichter Übergang zwischen Kamera und PEL erreicht werden. Dazu wurde ein Dichtring mit einem zur PEL passenden Durchmesser auf die Frontseite der Kamera montiert und Bohrungen für eine Halterung in der Bodenplatte vorgesehen (siehe Kapitel 5.2.3). Damit stand die endgültige Konfiguration der Gehäusestruktur fest.

5.2.2 Optik

Die optische Konstruktion war, wie bereits in Kapitel 5.1 erläutert, größtenteils durch die Kaufteile abgeschlossen. Es fehlten nur noch die Halterungen im Kameragehäuse.

Aufgrund der Ausrichtungsnotwendigkeit der Fokuspunkte aller optischen Komponenten zueinander mussten optische Translationstische verwendet werden. Sie ermöglichen die bereits eingebauten Komponenten axial zur Sichtachse zu verschieben und so eine Fokussierung durchzuführen. Allerdings ist dadurch auch die Bauhöhe der Kamera bedingt, da die Bauart der

Lineartische in keiner kleineren Konfiguration verfügbar war. Die Montage der Tische erfolgt durch vier Schrauben auf der Bodenplatte, wodurch jedoch als Nachteil unerwünschte Einbauwinkel in das optische System kommen können. Diese zu minimieren ist Teil der Justierung (siehe Kapitel 7.2). Alle Montagen auf den Tischen sind ebenfalls durch vier Schrauben fixiert, was wieder die Justierung beeinflusst. Zu sehen ist der gesamte Optikaufbau in Abbildung 22.

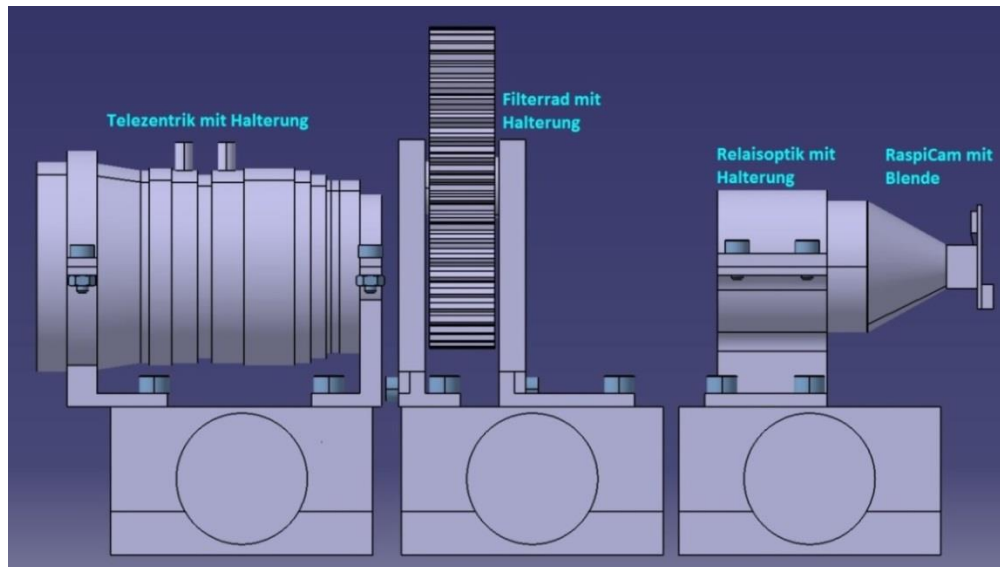


Abbildung 22: Optischer Aufbau der Kamera

Die Telezentrik ist auf dem ersten Tisch montiert. Als Halterung sind zwei auf die Telezentrik angepasste Schellen konstruiert worden, wobei das Lochmaß des Tisches und eine möglichst kompakte Bauweise der optischen Komponenten das Ziel waren. Die zwei Schellen, vorne und hinten an der Telezentrik, sind mit einer Spielpassung versehen, sodass sie nur der groben Justierung dienen. Die letztendliche Feinjustierung erfolgt mit Hilfe von Teflonband, um Fertigungsungenauigkeiten und minimale Winkel auszugleichen. Durch das Verschrauben der beiden Schellenteile und durch das Teflonband wird die Telezentrik mit Hilfe der Einspannung in Position gehalten. Um die Positionierung der Schellen auf dem optischen Tisch und an der Telezentrik zu erleichtern, ist die hintere Schelle um das Anschlussgewinde, ein Standard C-Mount Gewinde (M42), gelegt. Die hintere Schelle nimmt den Bauraum zwischen dem letzten Absatz und dem Ende des C-Mount Gewindes ein, wodurch kein zusätzlicher Bauraum erforderlich wird. Die Aussparung im Fuß der Schelle, zu sehen in Abbildung 23, resultiert aus der kompakten Bauweise und den geometrischen Abständen der Fokuspunkte.

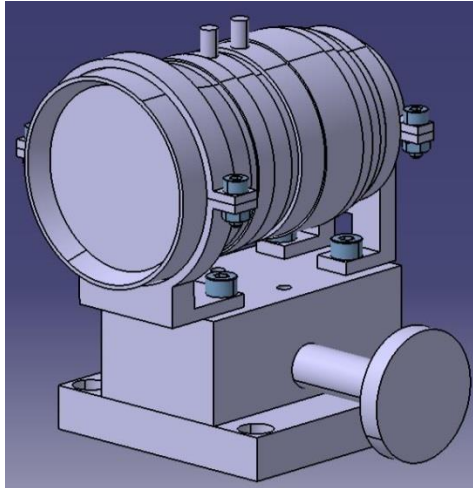


Abbildung 23: Telezentrik auf optischem Tisch

Analog dazu ist die Relaisoptik positioniert, das heißt, die Halterung durch eine Schelle erfolgt durch Anpressdruck mit Teflonband. Die grundlegende Ausrichtung der Relaisoptik wird durch die Bauform der Schelle ermöglicht, da die vorderste Ebene der Relaisoptik und der Schelle aufeinander abgestimmt sind (siehe Abbildung 22).

Die Filterebene gehörte konstruktiv zu den anspruchsvollsten Elementen. Für die Filterebene gab es im Wesentlichen zwei Konzepte, zum einen die Verwendung eines Filterstreifens, zum anderen die Verwendung eines Filtrerrades.

Der Filterstreifen hat nebeneinander angeordnete Filter, die durch lineares Verschieben des Streifens getauscht werden können. Die Positionierung wird durch federnde Druckstücke erreicht, die durch Einrasten die jeweilige Position fixieren. Dieses Konzept ist durch seine einfache Handhabung besonders geeignet für wenig komplexe Aufbauten, doch durch die notwendige rechtwinklige Positionierung im Gehäuse würde eine breitere Struktur erforderlich. Außerdem sind bei unzureichender Führung des Filterstreifens Verkanten und eventuell daraus resultierend unerwünschte Winkel möglich, was nachteilig für die Optik wäre.

Die Verwendung eines Filtrerrades bedarf einer komplexeren Konstruktion, da ein Welle-Nabe System konstruiert werden muss. Allerdings ist als Ergebnis ein geringerer Bauraum zu erwarten, der nur durch die Größe der Filter skaliert wird. Auch hier wird eine Positionierung und Fixierung mit Hilfe von federnden Druckstücken erzielt. Zusätzlich bestünde die Option, einen Motor zur Rotation des Filtrerrades parallel zur Rotationachse einzubauen, um die manuelle

Rotation zu automatisieren (siehe Kapitel 10.1). Aufgrund der zu erwartenden Vorteile eines Filtrerrades bezüglich des optischen Pfades, unabhängig vom Entwicklungsaufwand eines Filtrerrades gegenüber einem Filterstreifen, wurde dieses Konzept als Basis für die Konstruktion ausgewählt.

Die Konstruktion des Filtrerradsystems konnte durch die Verwendung eines Zahnrades, um den möglichen Anschluss eines Motors zu gewährleisten, in dem Sinne erleichtert werden, als dass die Fertigung eines Zahnrades durch den Kauf eines passenden Halbzeugs umgangen werden konnte. Allerdings wurde durch Stahl als Werkstoff für das Zahnrad ein deutlicher Massezuwachs in das System eingebracht, was im Vergleich zu einem Aluminiumzahnrad ungefähr der 4-fachen Masse entspricht. Da jedoch durch Verwendung des Kaufteils teure Fertigungskosten und die Fertigungsdauer gesenkt werden konnten, was einen größeren Einfluss auf die Masterarbeit hat als das Gewicht des Systems, wurde das Zahnrad eingekauft. Die Dicke des Filtrerrades resultiert aus der Fassung des 1000nm Filters, da diese doppelt so tief wie die anderen Filterfassungen und somit maßgebend ist. Die Filterbohrungen wurden mit Absätzen für die Filter versehen, sodass diese nur noch bis zum Anschlag des Absatzes eingeführt und eingeklebt werden müssen. Es wurden weiterhin auf beiden Seiten des Rades kleine Aussparungen für die federnden Druckstücke hinein gefräst, die in direkter Verlängerung der Bohrungen liegen. So wird neben der Positionierung eine möglichst gute Zentrierung der Filter erreicht, die ansonsten manuell nicht möglich wäre. Die Halterung des Filtrerrades, die die Verbindung mit dem optischen Tisch ermöglicht, enthält die federnden Druckstücke sowie die Kugellager der Welle-Nabe-Verbindung. Zu sehen ist die Konstruktion in einer Gesamtansicht in Abbildung 24.

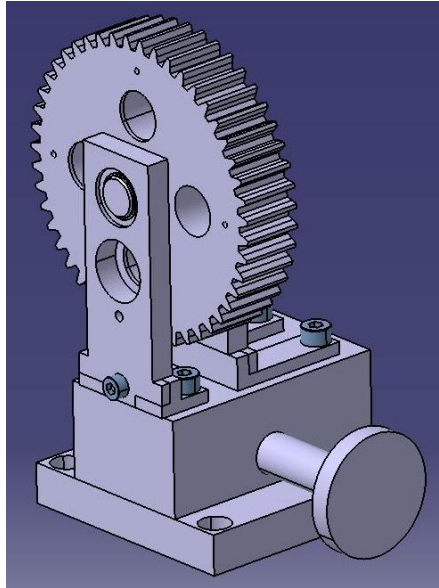


Abbildung 24: Filterrada ohne eingebaute Filter

Die letzte Komponente, die in der Kamera zu konstruieren war, ist die Halterung der RaspiCam und des Raspberry Pi in Abbildung 25. Aufgaben dieses Bauteils waren die Positionierung der RaspiCam in der optischen Achse, sowie die sichere Befestigung und der Wärmeabtransport aus dem Raspberry Pi.

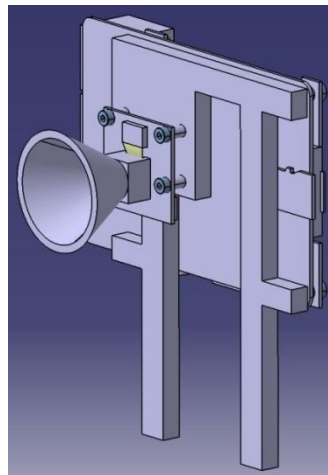


Abbildung 25: Halterung des Raspberry Pi und der RaspiCam mit Blende

Die RaspiCam-Platine ist mit vier Bohrungen für M2-Schrauben versehen. Diese werden genutzt, um die RaspiCam mit Hilfe von Abstandshülsen an der Halterung zu verschrauben. Durch die starre Verbindung der RaspiCam zu dem mit der Bodenplatte verschraubten Halter, wo nachteilig ebenfalls Winkel eingeleitet werden können, ist die Positionierung der RaspiCam abgeschlossen.

Auf der anderen Seite des Halters ist das Raspberry Pi, unter Verwendung von weiteren Abstandshülsen, angeschraubt worden, wobei die Orientierung der Platine durch die Kabelführung der Kamera, der Stromversorgung und der Kommunikationsleitung bedingt worden ist. Ein vertikaler Einbau wäre optional auch möglich gewesen, doch die Kabel wären dadurch anspruchsvolleren Biegeradien ausgesetzt, was als ein zu hohes Risiko für einen Kabelbruch angesehen wurde. Als Resultat der Vortests mit dem Raspberry Pi (siehe Kapitel 4.4) ist entschieden worden, eine passive Kühlung zu verwenden. Dabei soll die Temperatur des Raspberry Pi über eine thermisch mit Wärmeleitpaste angeschlossene Kupferplatte über die Halterung in die Struktur des Kameragehäuses geleitet werden.

Wie in Abbildung 25 zu erkennen, ist über der eigentlichen Kamera eine Blende montiert worden, die weniger dem Lichtschutz als mehr dem Staubschutz dient, da der CMOS-Chip nach dem Einbau (siehe Kapitel 7.1) offen liegt. Aufgrund der Baugröße wurde entschieden, dieses Bauteil mit einem 3D-Drucker zu erzeugen, wodurch es zusätzlich möglichst leicht ist. Diese Technik wurde auch für die Staubschutzkappe der Kamera angewendet (siehe Kapitel 7.1).

5.2.3 PEL Halterung

Die Montage der Kamera auf der PEL bedarf durch die Struktur des Entwicklungsmodells eigentlich keiner zusätzlichen Halterung, da sie sich theoretisch durch das Eigengewicht selbst stabilisiert. Allerdings ist für eine optimale Justierung und Ausrichtung der Kamera eine definierte Verschraubung mit der PEL erforderlich, weswegen eine einfache Struktur, siehe Abbildung 26, entworfen wurde.

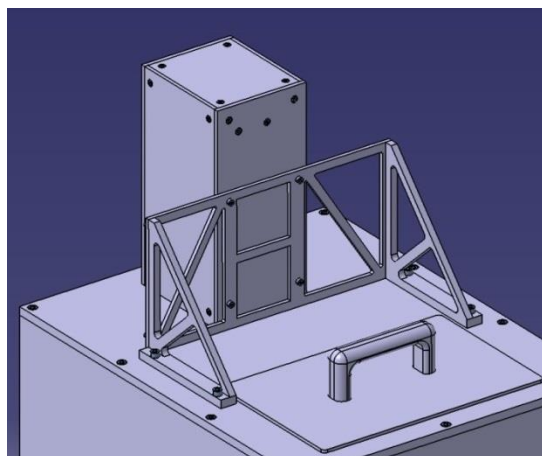


Abbildung 26: Kamerahalterung des Entwicklungsmodells für die PEL

Sie nutzt als Befestigungspunkte die Bodenplatte der Kamera auf der einen Seite und die Gewindebohrungen für die Handgriffe des Deckels der PEL auf der anderen Seite. Somit können unbeabsichtigte Verschiebungen oder eventuelle Schäden durch Umstürze verhindert werden.

6 Programmierung der Software

Die Software für das Entwicklungsmodell der VEM Kamera dieser Masterarbeit umfasst mehrere Programmteile und Programmiersprachen. Außerdem werden unterschiedliche Protokolle genutzt, die im Folgenden erläutert werden.

6.1 Raspberry Pi

Das Raspberry Pi ist ein Einplatinencomputer, der mit dem Betriebssystem Linux läuft. Da es von Linux viele unterschiedliche Varianten gibt, gilt das Gleiche auch für das Raspberry Pi. Es gibt sechs offizielle Betriebssysteme, die auf dem Raspberry Pi operieren können. Für diese Masterarbeit wurde das Standardbetriebssystem Raspbian genutzt. Nach dem Einlegen der SD-Karte, auf der sich das Betriebssystem befindet und dem Anschluss der peripheren Geräte (Tastatur, Maus, Bildschirm und Ethernetkabel), kann durch Anschluss der Stromversorgung das Raspberry Pi gestartet werden. Es folgt die Installation des Betriebssystems mit den üblichen Konfigurationen (Sprache, Zeit, Tastaturlayout, Netzwerkname des Raspberry Pi, Passwort, usw.), bis nach erfolgter Installation und anschließendem Neustart das Raspberry Pi auf die erste Inbetriebnahme wartet. Sofern nicht bereits während der Installation geschehen, sollte ein Update des Raspberry Pi durchgeführt werden, um eventuelle Sicherheitslücken oder Fehler des Betriebssystems zu beheben. Nach dem Update muss die Konfiguration der Platine, die für diese Masterarbeit notwendig ist, geladen werden, welche mehrere Installationen und Einstellungen benötigt, die in Tabelle 8 gelistet sind. (Raspberry Pi Foundation, 2015)

Tabelle 8: Konfigurationsbefehle für das Raspberry Pi (Raspberry Pi Foundation, 2015)

Nr.	Befehl	Einstellung	Bemerkung
1	sudo raspi-config	Punkt 5 - Kamera: enable	Aktivieren der Softwareunterstützung und Laden der Module zur Kamerasteuerung.
		Punkt 8, A4 – SSH aktivieren: enable	Aktivieren der Softwareunterstützung und Laden der Module zur Verwendung des SSH-Zugangs.

Nr.	Befehl	Einstellung	Bemerkung
2	sudo nano /boot/config.txt	disable_camera_led=1 hinzufügen	Die Kamera-LED ausschalten.
3	sudo apt-get install samba samba- common-bin	/	Installation des Serverprogramms Samba.
4	sudo nano /etc/samba/smb.conf	#security = user, Raute entfernen	Zugriff auf Netzwerkordner nur mit Passwort.
5	sudo smbpasswd -a [username]	/	User und Passwort für den Netzwerkordner anlegen.
6	sudo chown -R [username]:pi [filename]	/	User Zugriffsrechte für bestimmten Ordner erteilen.
7	sudo nano /etc/samba/smb.conf	[filename]	Alle zu 7. gehörenden Punkte müssen untereinander geschrieben werden; Ordnername im Netzwerk definieren.
		path = home/pi/[filename]	Pfad des zu lesenden Ordners, in dem der Inhalt für den Netzwerkordner liegt.
		available= yes	Der Ordner wird im Netzwerk freigegeben.
		browseable = yes	Der Ordner ist im Netzwerk sichtbar.
		writable = ok	Lese- und Schreibrechte für User erteilen.
		Guest ok = no	Es dürfen nur registrierte User zugreifen.
		Valid users = [username]	Registrierung der User.
8	sudo nano /etc/samba/smb.conf	[pi]	Alle zu 8. gehörenden Punkte müssen untereinander geschrieben werden; Analog zu 7. wird hier das Homeverzeichnis unterdrückt.
		path = home	Pfad des zu lesenden Ordners, in dem der Inhalt für den Netzwerkordner liegt.
		available= no	Der Ordner wird im Netzwerk freigegeben.
		browseable = no	Der Ordner ist im Netzwerk sichtbar.
		writable = no	Lese- und Schreibrechte für User erteilen.
		Guest ok = no	Es dürfen nur registrierte User zugreifen.
		Valid users = [username]	Registrierung der User.

Nr.	Befehl	Einstellung	Bemerkung
9	netstat -r -n	/	Gibt die aktuelle Gateway-Adresse des Raspberry Pi aus, notieren!
10	sudo nano /etc/network/interfaces	iface eth0 inet dhcp ersetzen durch iface eth0 inet static	Damit das Raspberry für einen SSH-Zugriff immer die gleiche IP zugewiesen bekommt, muss diese statisch sein. Auch hier wieder alle Befehle unter 10. untereinander in die Datei schreiben.
		address[Leerzeichen][IP]	Eintragen der gewünschten IP-Adresse, sollte zur Gateway-Adresse passen; typischer Weise: 192.168.137.XXX
		netmask[Leerzeichen][mask]	Netzwerkmaske eintragen, typischer Weise: 255.255.255.0
		gateway[Leerzeichen][IP]	Die unter 9. abgelesene IP eintragen, typischer Weise: 192.168.137.1
11	sudo shutdown -r now	/	Neustart durchführen, um die Änderungen zu aktivieren.

Die gelisteten Befehle sorgen für die Grundkonfiguration des Raspberry Pi, sodass Bilder aufgenommen werden können. Ein gutes Verständnis des Betriebssystems Linux ist für die Verwendung des Raspberry Pi notwendig, doch dies kann verhältnismäßig zügig erlernt werden.

6.2 Raspberry Pi Kamera Programmierung

Es gibt die Möglichkeit, eigene Kameras an das Raspberry Pi anzuschließen, doch hat das Kameramodul des Raspberry Pi den Vorteil, wie in Kapitel 5.1.4 beschrieben, direkt nach Anschluss an die Platine und Aktivieren der Softwareunterstützung (siehe Tabelle 8, 1.) verwendet werden zu können. Die Verwendung ist benutzerfreundlich gehalten, da durch eine einfache Befehlsstruktur die gewünschten Aufnahmeeinstellungen aufgerufen werden können.

Am gebräuchlichsten ist die Struktur: [Modus] [Optionen] [Speicherort]. Insgesamt sind drei Modi verfügbar, raspistill und raspiyuv für Fotos, sowie raspivid für Videos. Für die Arbeit wurde hauptsächlich raspistill verwendet, weswegen auch nur dessen Optionen hier erläutert werden.

Die Optionen von raspistill sind wichtige Konfigurationen für die Aufnahme und entscheiden wesentlich über die Qualität des Bildes. Einer der während dieser Masterarbeit für die Bildaufnahme verwendeten Befehle lautete:

```
raspistill --timeout 1 -ss 6000000 -bm -ISO 800 --awb off -awbg 1,1 --drc off --hflip --vflip --raw
--settings --nopreview --encoding png --output /home/pi/Pictures/$(date +%d.%m.%Y-
%H.%M.%S').png
```

In Tabelle 9 sind die gewählten Optionen kurz beschrieben.

Tabelle 9: Raspistill Optionen für das Entwicklungsmodell (Raspberry Pi Foundation, 2015)

Option	Erklärung
-timeout 1	Es wird ein Bild ohne Verzögerung aufgenommen.
-ss 6000000	Die Aufnahmedauer (Verschlusszeit) kann in Mikrosekunden eingestellt werden (6 Sekunden sind das Maximum).
-bm	Burstmode, um Bilder schnell hintereinander aufnehmen zu können. Allerdings werden einige Frames verworfen.
-ISO 800	Stellt den ISO-Wert ein: 800 ist für Nachtaufnahmen mit wenig Licht geeignet, jedoch ergibt dies ein stärkeres Rauschen bei zu hohen Beleuchtungsverhältnissen.
-awb off	Automatische Weiß-Balance Berechnung ist deaktiviert, um eine Verfälschung des Bildes zu verhindern.
-awbg 1,1	Stellt den Gain der roten und blauen Anteile der Pixel ein, hier jeweils 100%.
-drc off	Deaktiviert die dynamische Korrektur des Kontrasts.
-hflip	Spiegelt das Bild horizontal, um die Orientierung zu korrigieren.
-vflip	Spiegelt das Bild vertikal, um die Orientierung zu korrigieren.
-raw	Hängt an das Bild die unveränderten Rohdaten an; enthält Daten für 10-Bit Bilder, die jedoch durch den Benutzer selbst prozessiert werden müssen.
-settings	Gibt die Einstellungen der Belichtungszeit und der Gains aus.
-nopreview	Unterdrückt die Anzeige einer Vorschau, die über den HDMI-Anschluss ausgegeben werden würde.
-encoding png	Stellt das Standardformat JPEG auf PNG um, damit möglichst keine Bildinformationen beim Kompressionsverfahren verloren gehen.
--output /home/pi/Pictures/\$(date +%d.%m.%Y-%H.%M.%S').png	Gibt den Speicherort und Speichernamen, hier Datum und Uhrzeit mit Format, an.

Die Bilder werden, wie in dem Befehl zu erkennen, in dem Bildformat PNG gespeichert, was sich durch eine besonders verlustarme Speicherung auszeichnet. So werden die Rohdaten am besten erhalten und die Bilder sind für die Weiterverarbeitung besser geeignet als normale JPEG-

Aufnahmen. Zur Nutzung für diese Masterarbeit liegen die Bilder mit einer 8-Bit Auflösung vor, die bereits interne Kalibrierungen des Raspberry Pi durchlaufen haben. Die Aufnahmen an sich werden von einem C-Programm gesteuert, was in Kapitel 6.4 näher erläutert wird.

6.3 Temperaturmessung

Die Kabelführung und der Anschluss der Temperatursensoren an die Platine sind in Kapitel 7.1 beschrieben. Sie müssen vor der Inbetriebnahme des Raspberry Pi angeschlossen werden, da ansonsten die Sensoren nicht erkannt werden. Um die Temperatursensoren zu verwenden, bedarf es weiterer Einstellungen des Raspberry Pi, die in Tabelle 10 erläutert werden.

Tabelle 10: Konfigurationsbefehle für die Temperatursensoren (Raspberry Pi Foundation, 2015)

Nr.	Befehl	Einstellung	Bemerkung
1	<code>sudo nano /boot/config.txt</code>	Am Ende der Datei folgende Zeile anfügen: <code>dtoverlay =w1-gpio-pullup, pullup=4</code>	Mit diesem Befehl wird in der Konfigurationsdatei beim Booten bereits das 1-Wire Protokoll in den Prozessor geladen und zusätzlich ein Pull-Up Widerstand am Datenleitungsport aktiviert.
2	<code>sudo nano /etc/modules</code>	Am Ende der Datei folgende zwei Zeilen anfügen: <code>w1-gpio pullup=1 w1-therm</code>	Aktiviert die Module für die Temperatursensorik.
3	<code>sudo shutdown -r now</code>	/	Neustart durchführen, um die Änderungen zu aktivieren.
4	<code>cd /sys/bus/w1/devices</code>	<code>ls -l</code>	Springt in das Verzeichnis, wo sich die Temperatursensoren befinden sollten, die an ihrer Seriennummer (28-000...) zu erkennen sind. (Wenn nicht vorhanden, Neustart und korrekten Anschluss prüfen!)
5	<code>cd /28-000...</code>	<code>nano w1-slave</code>	Öffnet die Datei von einem Sensor und zeigt dessen Temperatur sowie die dabei generierten Checksummen an. (Die Temperaturen werden in Tausendstel Grad gezeigt und enthalten kein Komma.)

Das C-Programm, das den Auslesevorgang der Temperatursensoren steuert, wird in Kapitel 6.4 näher erläutert.

6.4 Software des Entwicklungsmodells

Das Kapitel beschreibt den allgemeinen Ablauf der Programme des Entwicklungsmodells sowie die eigentliche Nutzung des Modells in Form eines Benutzerhandbuchs.

6.4.1 Allgemeiner Programmablauf des Entwicklungsmodells

Die Programmierung des Entwicklungsmodells ist in der Programmiersprache C gehalten. Es gibt zwei Programme, die für den Betrieb der Kamera notwendig sind, zum einen die Erfassung der Temperatur (VEMSoftware) und zum anderen die Steuerung der Testbildserie (VEMPicture). Die beiden Programme zur Temperaturmessung und Bildaufnahme befinden sich als Struktogramm im Anhang dieser Arbeit. Der Programmablauf wird durch den Nutzer der Kamera festgelegt, doch im Allgemeinen ist der Programmablauf wie im folgenden Flussdiagramm (siehe Abbildung 27) dargestellt.

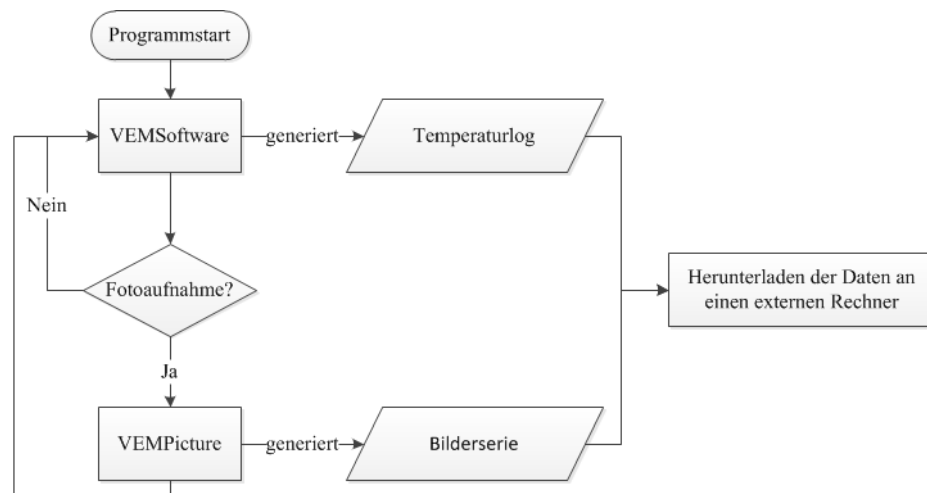


Abbildung 27: Flussdiagramm der Programme des VEM Entwicklungsmodells

Um die Temperaturmessung verwenden zu können, muss auf dem Raspberry Pi ein zusätzliches Programm installiert werden, WiringPi (Henderson, 2015). Es generiert eine Schnittstelle, um die GPIO-Ports mit C-Programmen nutzen zu können. Ein Durchlauf der Routine zum Temperatúrauslesen dauert ca. 8,5 Sekunden, was bei der eingestellten Anzahl von 200 Zyklen ungefähr 28 Minuten Laufzeit entspricht. Für die Auswertung der Temperaturdaten ist ein passendes Excel Dokument erzeugt worden, was grafisch den Temperaturverlauf der Kamera wiedergibt. Programmtechnisch wird bei der Temperaturmessung die aktuelle Temperatur aller

Temperatursensoren ausgelesen und konvertiert, mit einem Zeitstempel versehen und abschließend in eine Ausgabedatei geschrieben.

Die Bildgenerierung folgt einem Schema, das aus der Testphase resultiert und daher speziell auf diese Aufgabe zugeschnitten worden ist. Prinzipiell wird der Befehl aus Kapitel 6.2 zeitlich modifiziert, sodass die gesamte Bildserie der Testsequenz in einem Durchlauf gewonnen wird (siehe Struktogramm im Anhang). Sollen jedoch Serienbilder mit einer bestimmten Dauer oder Einzelbilder aufgenommen werden, so sind weitere Befehle notwendig, die ebenfalls in einem Dokument im Anhang verfügbar sind. Abbildung 28 zeigt den Ablauf der Bildprozessierung mit den jeweiligen Schritten, der bei dem Entwicklungsmodell angewendet wird. Die verwendeten Programme werden in Kapitel 6.5, die Auswertung in Kapitel 9.2 erläutert.

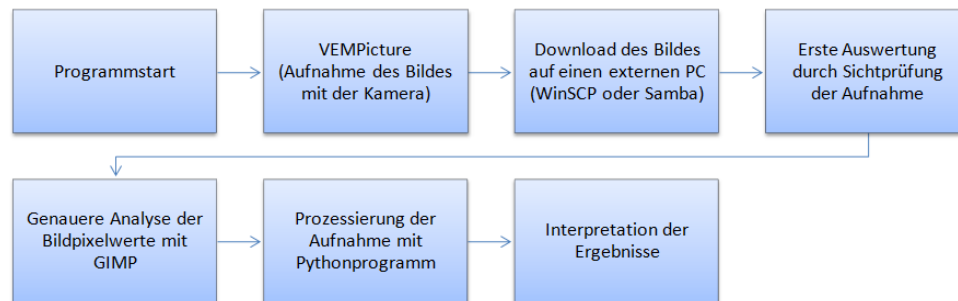


Abbildung 28: Schematischer Ablauf der Bildprozessierung des Entwicklungsmodells

Zur Verwendung eines der beiden bisher vorhandenen Programme muss das jeweils andere, aktuell laufende Programm abgebrochen werden, was in kommenden Versionen überarbeitet werden muss (vgl. Kapitel 10.2).

6.4.2 Benutzerhandbuch für die Steuerung des Entwicklungsmodells

Im Folgenden wird eine kurze Anleitung für das Entwicklungsmodell beschrieben und die notwendigen Schritte für die Bedienung des Modells erläutert.

Nach dem Einschalten des Entwicklungsmodells, durch Anschluss der Stromversorgung und des Ethernetkabels, wird nach ca. einer Minute der Zugriff über PuTTY (siehe Kapitel 6.5) nach Eingabe der Zugangsdaten ermöglicht. Es kann unter Umständen ein erneutes Anschließen der Kabel erforderlich sein, sollte nach ca. 2 Minuten noch keine Verbindung bestehen oder es während des Betriebs zu Verbindungsabbrüchen kommen.

Nach der erfolgreichen Akquisition wird im Netzwerk ein neuer Rechner angezeigt, VEMCam, welcher durch Samba, einem Programm, das unter Linux für Netzwerkstrukturen sorgt, erstellt worden ist. Innerhalb des Netzwerklaufwerks befinden sich die beiden Ordner Software und Pictures. Der Zugriff auf die Ordner wird durch die Eingabe der Zugangsdaten für das Entwicklungsmodell freigeschaltet. Sobald dies erfolgreich abgeschlossen worden ist, ist das Entwicklungsmodell einsatzbereit.

In der Startkonfiguration sind bereits alle Sensoren geladen, sodass nur noch die Programme gestartet werden müssen. Diese befinden sich im Ordner /home/pi/Software, in den mit „cd“ (change directory) gewechselt werden muss. Von dort aus werden die Steuerungsbefehle für die Kamera erteilt.

Die Temperaturerfassung wird nach Eingabe des Befehls „./VEMSoftware“ gestartet. Die Temperatur wird in der Datei VEMTemperaturelog.txt gespeichert und kann von dort durch das externe Excelfile „VEM Temperature.xlsx“ ausgelesen werden, wobei hierfür zuerst der Zugriff auf die Netzwerkordner erfolgt sein muss. Beim Start des Excelfiles wird die erste Aktualisierung der Temperaturdaten durchgeführt, danach automatisch alle 15 Minuten.

Die Aufnahme von Bildern erfolgt mit dem Befehl „./VEMPicture“. Es wird automatisch die Testsequenz von Bildern aufgenommen und im Netzwerkordner Pictures bereitgestellt. Von dort können die Bilder dann heruntergeladen werden, wobei es sich aus Gründen der Speichernutzung empfiehlt, die Bilder nach dem Herunterladen zu löschen, um keinen Speicherplatz auf dem Entwicklungsmodell zu blockieren.

Um die Programmabläufe modifizieren zu können, befinden sich in dem Ordner Software die zugehörigen Quellcodes.

6.5 Zusätzliche Programme

Da die erstellten Programme der vorliegenden Masterarbeit Neuentwicklungen sind, verfügen die Steuerung und Bedienung des Entwicklungsmodells bislang noch über kein eigenständiges Nutzerprogramm mit zugehöriger EGSE (Electrical Ground Support Equipment), sondern es muss auf lizenzfreie Software zurückgegriffen werden. Die für die Masterarbeit zusätzlich verwendeten Programme werden hier kurz erklärt.

Die Kommunikation fand über Ethernet mit einem SSH-Zugriff statt. Dieses Zugangs bedienten sich zwei Programme, PuTTY (PuTTY, 2015) und WinSCP (WinSCP, 2015).

PuTTY ermöglicht eine Remotesteuerung des Raspberry Pi über eine Eingabekonsole und verhält sich analog zu dem Zugriff ohne Remotezugang. Alle notwendigen Steuerkommandos und Programmstarts werden darüber gesteuert.

WinSCP hingegen wird für die Datenübertragung auf einen Windowsrechner benötigt. So können einfach, nach Aufbau der Verbindung, Daten vom Raspberry Pi heruntergeladen werden, was vor allem für die Bilder notwendig ist, da die SD-Karte nur begrenzt Bilder aufnehmen kann. Dies gilt insbesondere für die Bilder mit den Rohdaten, wo ein Bild ca. 13 – 15 Megabyte groß ist. Sollte also eine Serie geschossen werden, um zum Beispiel den Fehler durch Rauschen zu minimieren (durch Überlagern der Bilder mit weiteren Programmen), kommen bei nur 10 Bildern, was für statistische Analysen sehr wenig ist, bis zu 150 MB Daten zusammen. Die Verwendung von WinSCP resultiert aus Problemen mit dem Zugang zu den Netzwerkordnern, die durch Samba bereitgestellt werden, da diese nicht immer angezeigt wurden und somit der Download nur über WinSCP möglich war.

Das Bildbearbeitungsprogramm GIMP (GIMP, 2015) wurde für erste Analysen der Bilder genutzt. Es eignet sich gut, um erste Aussagen über die Ergebnisse treffen zu können, ohne ein weiterführendes Auswertungsprogramm verwenden zu müssen.

Das letzte Programm, das für diese Masterarbeit genutzt wurde und das ebenfalls der Bildauswertung dient, war ein durch den DLR-Mitarbeiter Mario D'Amore entwickeltes Python Programm, welches in Kapitel 9.2 näher erläutert wird. (D'Amore, 2015)

7 Integration, Aufbau und Justierung des Entwicklungsmodells

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Aufbau und der Justierung der Kamera. Die dafür vorgenommenen Schritte werden hier ausführlich erläutert.

7.1 Integration der Kamera

Die Fertigung der Kamerastruktur wurde durch die im DLR befindliche Werkstatt durchgeführt. Dadurch ergab sich die Möglichkeit, auch kurzfristige Änderungen und Nacharbeiten an den Teilen zeitnah durchführen zu lassen.

Parallel zur Fertigung wurden die notwendigen Lötarbeiten durchgeführt, welche für die Kommunikationsports unerlässlich waren. Dabei wurden ein USB-Kabel und ein Ethernet-Kabel gelötet, wobei das Ethernetkabel aus einzelnen, miteinander verdrehten Kabeln aufgebaut worden ist. Das ist notwendig, da Ethernetkabel geschirmt sein müssen, was durch das richtige Verdrehen der Datenleitungen und der anschließenden Ummantelung durch geerdete Leitungen erreicht wird. Die Abbildung 29 zeigt das Resultat der Lötarbeiten von der Ethernetbuchse auf der Unterseite des Raspberry Pi.

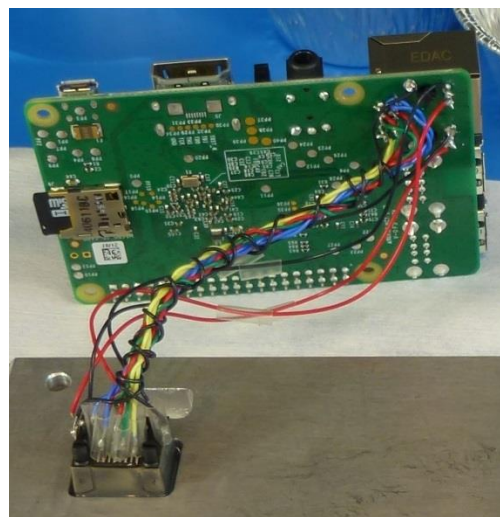


Abbildung 29: Gelötete Ethernetkabelverbindung zwischen Buchse und Raspberry Pi

Das ursprünglich geplante Entfernen der Buchse auf der Oberseite des Raspberry Pi, für den Einbau in die Gehäusestruktur, war einerseits aufgrund der rechtwinklig herausgeführten Pins der Buchse nicht möglich, andererseits wurde ein Teil der für Ethernetverbindungen notwendigen Hardware innerhalb der Buchse verarbeitet. Aus diesem Grund wurde die in Abbildung 29 zu sehende, zusätzlich angebrachte Buchse mit horizontal herausgeführten Pins verbaut.

Für die USB-Buchse wurde ebenfalls eine horizontale Führung der Pins gewählt, allerdings wurde eine USB-A-Buchse verbaut anstatt der auf der Platine befindlichen Mikro-USB-Buchse, da Standard USB-Kabel gebräuchlicher sind.

Ein weiterer vorbereitender Prozess war es, die RaspiCam zu modifizieren, da deren, ab Werk verbautes, Linsensystem vor dem Einbau in das Entwicklungsmodell demontiert werden musste, weil es für diese Masterarbeit nicht verwendet werden konnte. Die RaspiCam zu demontieren war insofern eine Herausforderung, als dass keine genauen Informationen über die innere Beschaffenheit des Moduls vorlagen. Es gab zwar Anleitungen zur Demontage im Internet (SingletonMillerWiki, 2013), doch diese konnten eher als grobe Richtlinien verwendet werden. Die Hauptproblematik bei der Demontage stellte die empfindliche Struktur der RaspiCam dar, da diese bei zu viel mechanischer Beanspruchung eventuell beschädigt werden könnte. Weiterhin musste die ESD-Empfindlichkeit (Electro Static Discharge) des Systems beachtet werden, um Beschädigungen durch elektrische Entladungen zu verhindern.

Um die Linsen der RaspiCam zu demontieren, musste zuerst das Flachbandkabel, durch das Lösen der Arretierung an der Platinenunterseite, entfernt werden. Danach wurde versucht, den Stecker zwischen der Platine und der Kamera abzuziehen, doch aufgrund der filigranen Struktur wurde dies verworfen, da eine Beschädigung nicht ausgeschlossen werden konnte. Auch das Herausdrehen des eingeschraubten Linsensystems gestaltete sich als nicht praktikabel, da dieses eingeklebt worden und somit nicht zerstörungsfrei zu entfernen war. Deswegen wurden mit einem Skalpell und einer Pinzette vorsichtig die einzelnen Linsen aus der Fassung entfernt und der CMOS-Chip freigelegt. Anschließend wurden Späne und im optischen Pfad liegende Hindernisse entfernt. Als abschließende Schritte wurde die RaspiCam wieder zusammengesetzt und die 3D-gedruckte Blende mit Scotch-Weld, einem zwei Komponentenkleber, angeklebt, um Staub auf dem CMOS-Chip zu vermeiden. Die Fotoserie von Abbildung 30 zeigt diesen Vorgang.

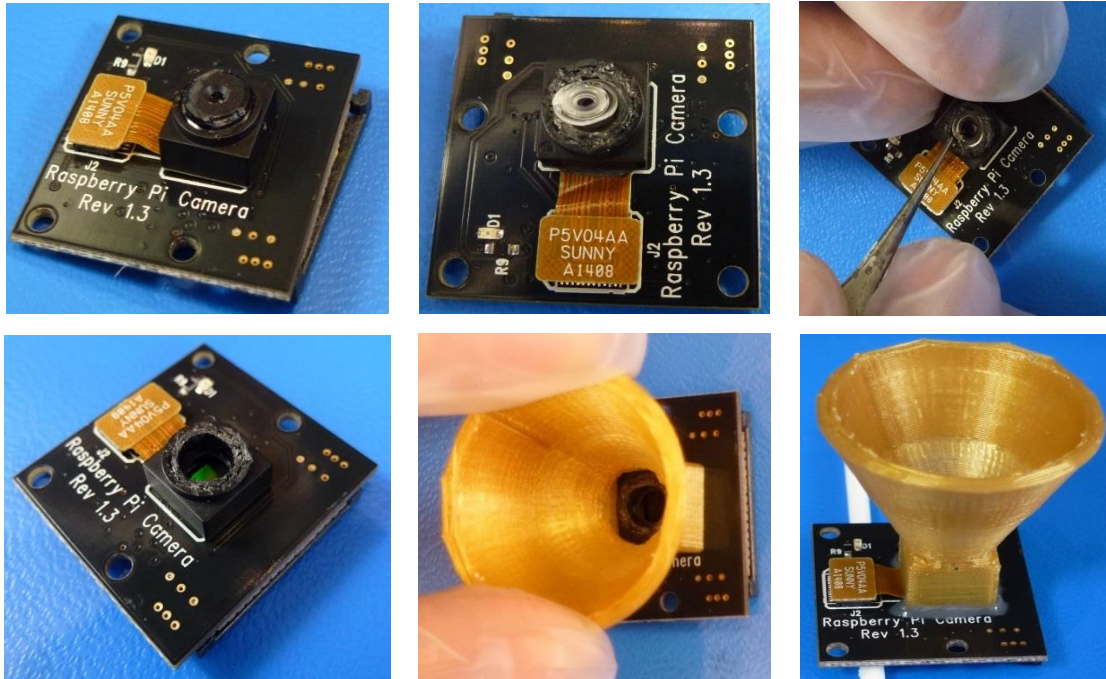


Abbildung 30: Vorbereitung der RaspiCam in zeitlicher Reihenfolge von links oben nach rechts unten

Nach Abschluss der Vorbereitungen und der Lieferung der Bauteile erfolgte eine Eingangsinspektion und die Kamera wurde testweise integriert, um mögliche Fertigungsungenauigkeiten oder kritische Stellen zu identifizieren. Nach Abschluss der Inspektion und kleinerer Korrekturen wurden die Bauteile unter Reinraumbedingungen gereinigt und für die Integration vorbereitet.

Danach wurde schrittweise integriert, angefangen mit den gelöteten Kommunikationsports, die mit Scotch-Weld in die Struktur eingeklebt wurden (siehe Abbildung 31).



Abbildung 31: Verkleben der Kommunikationsports mit der Außenwand der Struktur

Anschließend wurde die Kamera sukzessive von der Frontplatte über die Optik und Elektronik bis hin zum Gehäuse integriert. Es wurde bereits eine grobe Justierung der Optik durch Ausrichtung der Befestigungspunkte und die Verwendung von Teflonband für die Schellen vorgenommen. Das Ergebnis wird in der Abbildung 32 in einer kurzen Fotoserie gezeigt.

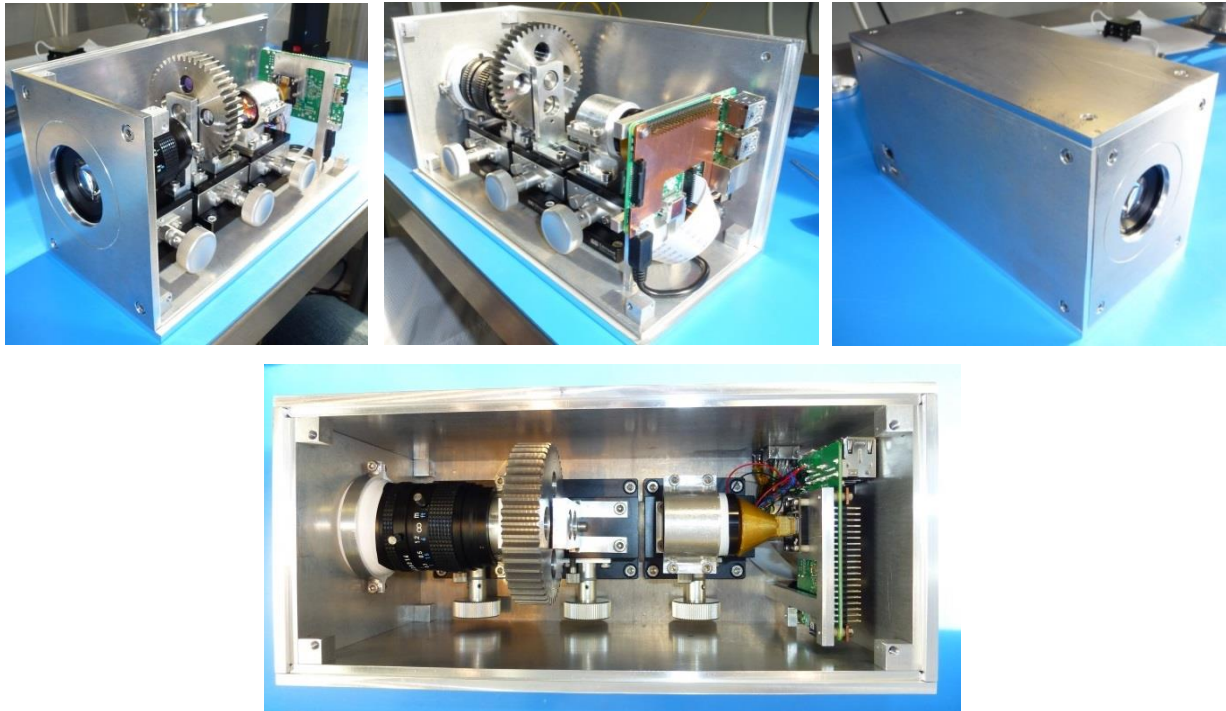


Abbildung 32: Ergebnis der Integration der Kamera. Oben links: Seitlicher Blick auf die Stirnseite der geöffneten Kamera. Oben Mitte: Seitlicher Blick auf die Rückseite der geöffneten Kamera. Oben rechts: Gesamtansicht der geschlossenen Kamera. Unten: Draufsicht auf die geöffnete Kamera mit Blick auf die einzelnen Komponenten.

Der Einbau der Temperatursensoren erfolgte erst nach den genaueren Justierarbeiten der Optik, da die Kabelführung die Justierung ansonsten behindert hätte. Bei der Konfektionierung der Kabel ist auf eine ausreichende Kabelreserve geachtet worden, um gegebenenfalls auf Störungen oder Probleme reagieren zu können. Die Kabel werden sukzessive durch die gesamte Struktur der Kamera geführt, angefangen mit dem Raspberry Pi über die Struktur und Optikkomponenten bis hin zur Frontplatte. Die genauere Reihenfolge der Positionierung, die ebenfalls der Reihenfolge der Temperatursensorenabfrage im Programm sowie der Darstellung im Auswertungsdiagramm entspricht, ist wie folgt:

1. Kamerastruktur (Kupferplatte bei Raspberry Pi Platine)
2. Kamerastruktur (Rückwand gegenüber der Kupferplatte)
3. Kamerastruktur (Raspberry Pi Halterung, nahe dem Anschraubpunkt zur Bodenplatte)

4. RaspiCam-Platine (direkt neben dem Sensor)
5. Kamerastruktur (Relaisoptikgehäuse, nahe dem Übergang zur Blende)
6. Kamerastruktur (Bodenplatte, nahe dem Anschraubpunkt zur Raspberry Pi Halterung)
7. Kamerastruktur (nahe der Kommunikationsports)
8. Kamerastruktur (Telezentrikhalterung, auf Höhe des C-Mount)
9. Kamerastruktur (Telezentrikhalterung, nahe der Telezentrikblende)
10. Kamerastruktur (Frontplatte, nahe der Telezentrik)

Alle Sensoren wurden zusammengelötet und dann an den jeweiligen Positionen mit Kapton festgeklebt, was in der Kamera zu der in Abbildung 33 gezeigten Konfiguration geführt hat.

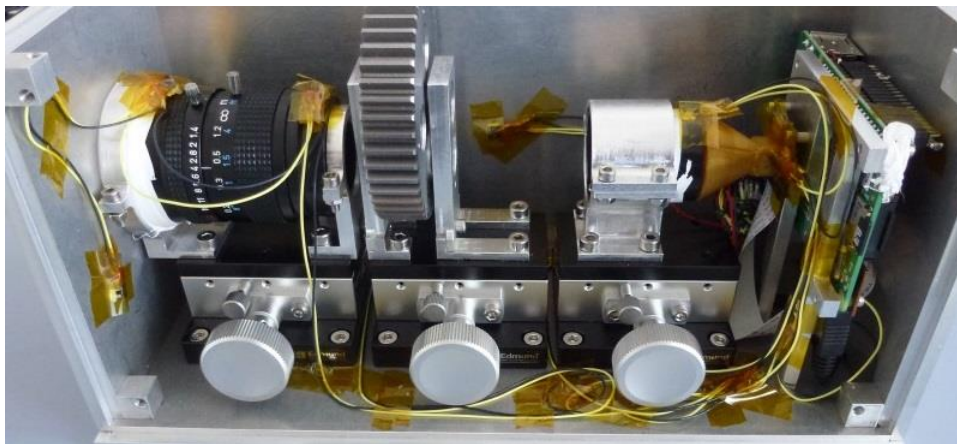


Abbildung 33: Kamera mit integrierten Temperatursensoren

Für eine bessere Wärmeübertragung wurden die Sensoren mit einer Wärmeleitpaste versehen, die sich auch zwischen der Kupferplatte und den Raspberry Pi Wärmequellen befindet (siehe Abbildung 34).



Abbildung 34: Wärmeleitpaste auf dem Raspberry Pi zur effizienteren Übertragung der Wärme auf die Kupferplatte

Der letzte Schritt nach Abschluss der Integration war es, die Staubschutzkappe an der Kamera anzubringen. Der 3D-gedruckte Deckel wird durch Teflonband und leichten Anpressdruck in Position gehalten und verhindert so das Verschmutzen der Telezentrik (siehe Abbildung 35). Außerdem ist der mit Scotch-Weld eingeklebte Dichtring zu sehen, der nach Zusammenbau der Kamera und vor der Integration der Temperatursensoren montiert wurde und der parasitäres Streulicht zwischen Kamera und PEL verhindern soll.

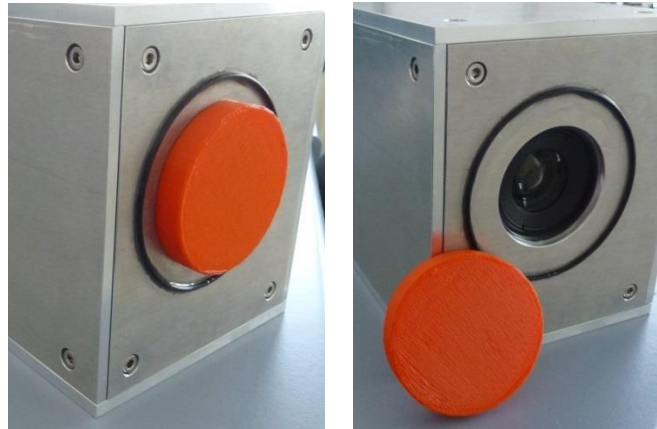


Abbildung 35: Staubschutzdeckel der Kamera

7.2 Justierung der Optik

Die Justierung der Optik erfolgte nach der ersten Inbetriebnahme der Kamera mit Hilfe eines Schwarzkörperstrahlers, um auch die Filtereinstellungen kalibrieren zu können. Dazu wurde die Kamera im definierten Abstand vor einem Schwarzkörperstrahler positioniert und durch eine variable Lochblende beleuchtet. Um das umliegende Streulicht abzublocken, wurde die Justierung in einer verdunkelten Umgebung durchgeführt, sodass nur noch die Strahlungsquelle gesehen wurde.

Während der Justierung wurde klar, dass jedes optische Element für sich mehrere mögliche Positionen, Abstände und Winkel zu den anderen Elementen besitzen kann, die den optischen Pfad des Systems beeinflussen können. Dies resultiert aus dem Aufbau der Kamera, der Toleranzen durch Fertigungsungenauigkeiten und der Feinjustierung der Schellenhalterung mit Teflonband. Diese Tatsache erschwerte die Justierung der Kamera. Letztendlich wurde die Justierung durch Bestimmen einer festen Position der Telezentrik und Abstandsänderung aller anderen Kamerakomponenten in Bezug auf die Telezentrik durchgeführt. Die größte Herausforderung bei der Justierung stellte die Relaisoptik dar, da diese auf minimale Winkel und

Abstandsänderungen mit deutlichem Einfluss reagierte. Der in Kapitel 2.1 beschriebene Effekt der Änderung der PSF über die Wellenlänge konnte ebenfalls beobachtet werden, je nachdem, welcher Filter in den optischen Pfad gedreht wurde. Abbildung 36 zeigt zwei Bilder, die während der Justierung mit der Kamera ohne einen im optischen Pfad befindlichen Filter aufgenommen wurden.



Abbildung 36: Die Kamera vor und nach der Justierung im optischen Grenzbereich

Es ist gut zu erkennen, dass, durch die verbesserte Justierung der Kamera, die Bildqualität des Entwicklungsmodells von dem verschwommenen Zustand links auf einen guten Zustand rechts erhöht werden konnte.

Um die theoretische Abbildungsqualität dieser Kamera zu ermitteln, müsste die PSF des Entwicklungsmodells mit geeigneten Programmen, zum Beispiel Zemax, bestimmt werden. Da dies jedoch, wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, die genauen Linsenpositionen, deren Abstände sowie Materialien benötigen würde, ist diese theoretische Berechnung hier nicht möglich, da die Hersteller der Telezentrik diese Informationen nicht herausgeben. Was stattdessen beispielhaft bestimmt werden konnte, ist das Rayleigh-Kriterium des Entwicklungsmodells für den 905nm Filter. Dies ergibt sich zu $\alpha = 1,22 \cdot \frac{905\text{nm}}{48\text{mm}} = 0,0013^\circ$, was der theoretischen Auflösung von VEM sehr nahe kommt (vgl. Kapitel 2.1).

Die Ermittlung der realen PSF der Kamera dieses Entwicklungsmodells wurde im Rahmen dieser Masterarbeit nicht durchgeführt, könnte jedoch empirisch durch zusätzliche Tests mit Hilfe einer Laserquelle durchgeführt werden (siehe Kapitel 10.1). Anhand des entstehenden Bildes, das eine Form wie ein Airy-Scheibchen besitzen würde, könnte dann auch für jede Wellenlänge das Rayleigh-Kriterium überprüft werden.

8 Montage und Test des Entwicklungsmodells an der PEL

Die Montage der Kamera auf der PEL ist prinzipiell sehr einfach, da die Anbauposition durch Positionierung der Halterung des Entwicklungsmodells vorgegeben ist. Nach der Vorbereitung der Kammer für die Tests ist nochmal eine Justierung der Kamera durchgeführt worden, um Abweichungen in der Justierung zu beseitigen. Der Testaufbau ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt.

Die Tests sind mit drei unterschiedlichen Probenmaterialien durchgeführt worden, da bisher keine Erfahrungen mit abbildenden Spektrometern gesammelt werden konnten. Die drei Konfigurationen waren:

1. Eine Standardprobentasse mit 55mm Durchmesser, gefüllt mit einem pulverförmigen Schwarzkörper (Korngröße kleiner 500µm).
2. Eine durch einen Steg geteilte Probentasse mit 55mm Durchmesser, gefüllt mit einem pulverförmigen Schwarzkörper (Korngröße 125 – 250µm) und einem pulverförmigen Komatiit (vulkanisches Gestein mit einer Korngröße zwischen 125 – 250µm).
3. Eine feste Basaltscheibe, die auf einer Stahlscheibe liegt.

Diese drei Konfigurationen wurden anhand einer Testprozedur untersucht. Die Testprozedur für den Testlauf der Kamera mit einer Probe ist in Tabelle 11 gelistet. Aufgrund der Dauer eines Testlaufs mit einer Probe wurde entschieden, die drei geplanten Tests auf drei Tage zu verteilen.

Tabelle 11: Testprozedur für die Kamera

Nr.	Aufgabe	Einstellung	Bemerkung
1	Start Temperaturlog der Kammer und der Kamera	Start	/
2	Start Evakuierung der PEL	Ein	Warten auf Stabilisierung des Vakuums (ca. 15 – 20 min)
3	Testfotos aufnehmen	Visible (VIS)	Überprüfung, ob Kamera nominell läuft
4	Temperatur einstellen	150°C	Warten auf Stabilisierung der Temperatur
5	Testfotos aufnehmen	VIS + drei Filter	Aufnahme der Testbilder
6	Temperatur einstellen	250°C	Warten auf Stabilisierung der Temperatur
7	Testfotos aufnehmen	VIS + drei Filter	Aufnahme der Testbilder
8	Temperatur einstellen	350°C	Warten auf Stabilisierung der Temperatur

Nr.	Aufgabe	Einstellung	Bemerkung
9	Testfotos aufnehmen	VIS + drei Filter	Aufnahme der Testbilder
10	Temperatur einstellen	450°C	Warten auf Stabilisierung der Temperatur
11	Testfotos aufnehmen	VIS + drei Filter	Aufnahme der Testbilder und Serienbilder
12	Heizung ausschalten	Aus	Temperatur auf ca. 60°C abkühlen lassen (ca. eine Stunde, abhängig vom Vakuum)
13	Vakuumpumpe ausschalten	Aus	Vorsichtig belüften (ca. 30 -40 Minuten)
14	Temperaturlog der Kammer und der Kamera ausschalten	Stop	/

Die Temperaturverläufe wurden, wie in der Testprozedur beschrieben, aufgezeichnet, um zusätzliche Metadaten zu den Fotos zu generieren. Die Metadaten umfassen die Temperatur der Probe und des CMOS-Chips, sowie den aktuellen Vakuumwert und die Heizleistung zum Aufnahmezeitpunkt des Fotos. Sie sind in einem zusätzlichen Excelldokument, für jeden Test einzeln, zusammengefasst worden. Abbildung 37 zeigt den Temperaturverlauf der Kamera während der Tests der geteilten Probe, während Abbildung 38 den dazu passenden Temperaturverlauf der Probe zeigt.

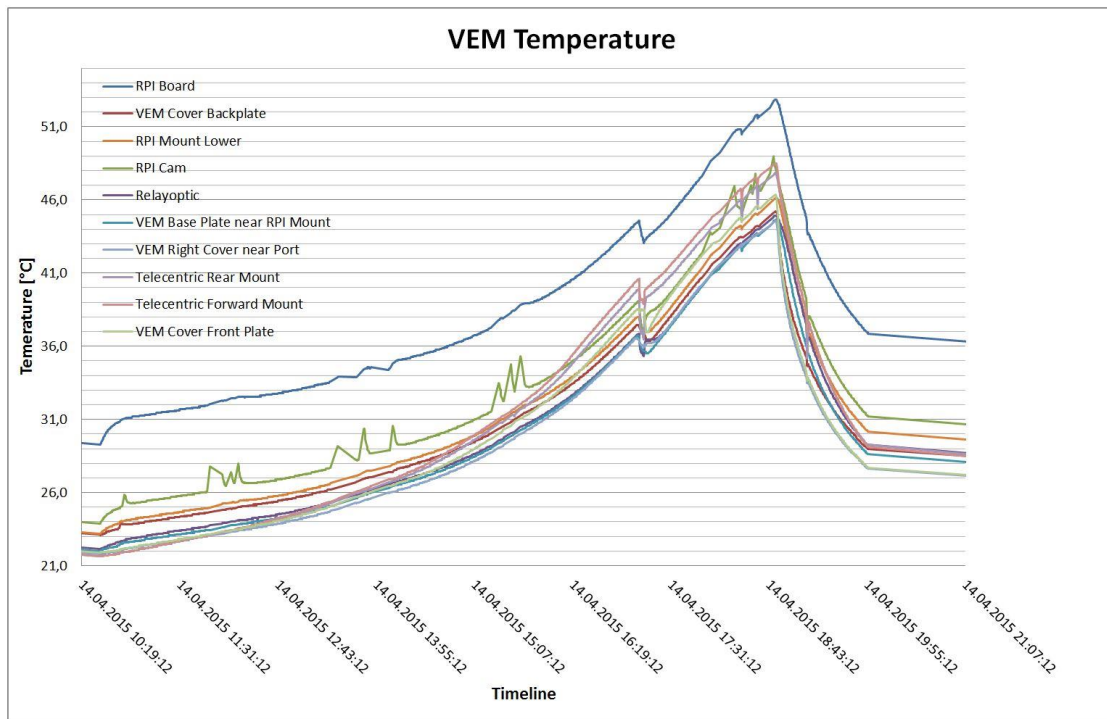


Abbildung 37: Temperaturverlauf der Kamera während des ersten Tests mit der geteilten Probe

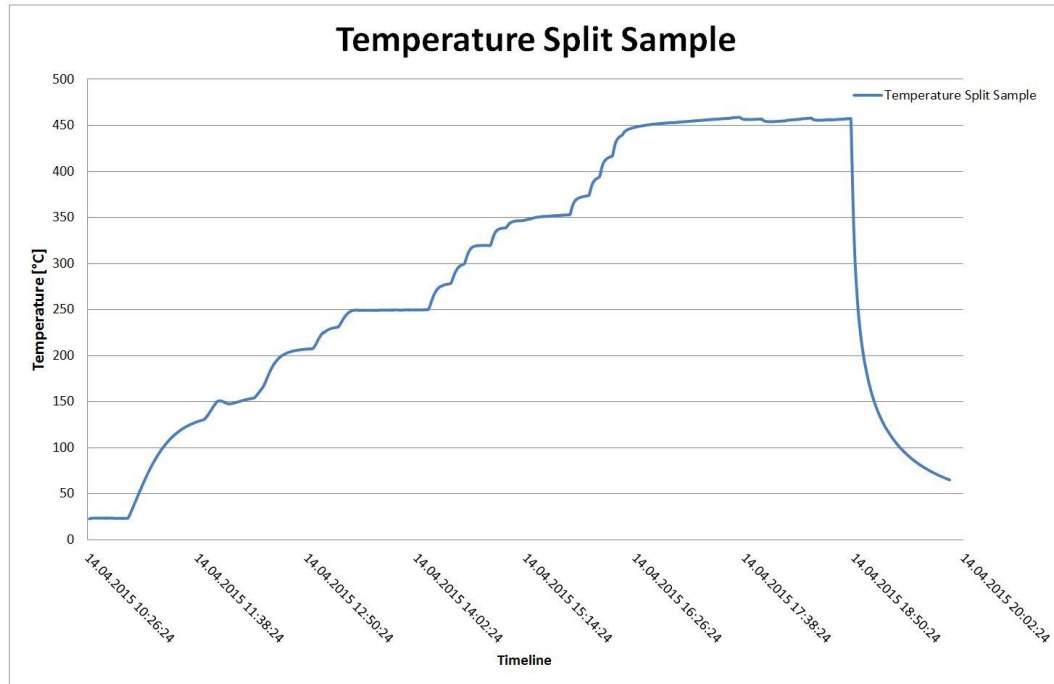


Abbildung 38: Temperaturverlauf des Schwarzkörpers während des ersten Tests mit der geteilten Probe

Die Temperatur des Heizers der Probe wird über einen Drehschalter eines Amperemeters eingestellt. Die Rückkopplung erfolgt über die Temperatursensoren in der Probe, was für die genaue Regelung der Temperatur nachteilig ist, da die Einstellung des Heizers per Hand vorgenommen werden muss. Dies ist gut in Abbildung 38 zu erkennen, wo Schwankungen um die Zieltemperaturen aufgetreten sind.





Analog zu den Temperaturkurven des hier gezeigten Tests verlaufen auch die Kurven der übrigen Tests, wobei sich die Temperatur der Kamera hauptsächlich durch die Verweilzeit auf der PEL bei 450°C unterscheidet. Die Temperatur der Kamerastruktur erhöht sich stark durch die Erwärmung der PEL bis auf ungefähr 50 Grad Celsius. Dies führt zu einer vorher nicht bekannten Komplikation, da die passive Temperaturkühlung der Kamera darauf ausgelegt ist, über die Struktur Wärme abzugeben anstatt sie zu absorbieren. Lösungen für diese Problematik werden in den Kapiteln 10.1 und 10.3 erörtert.

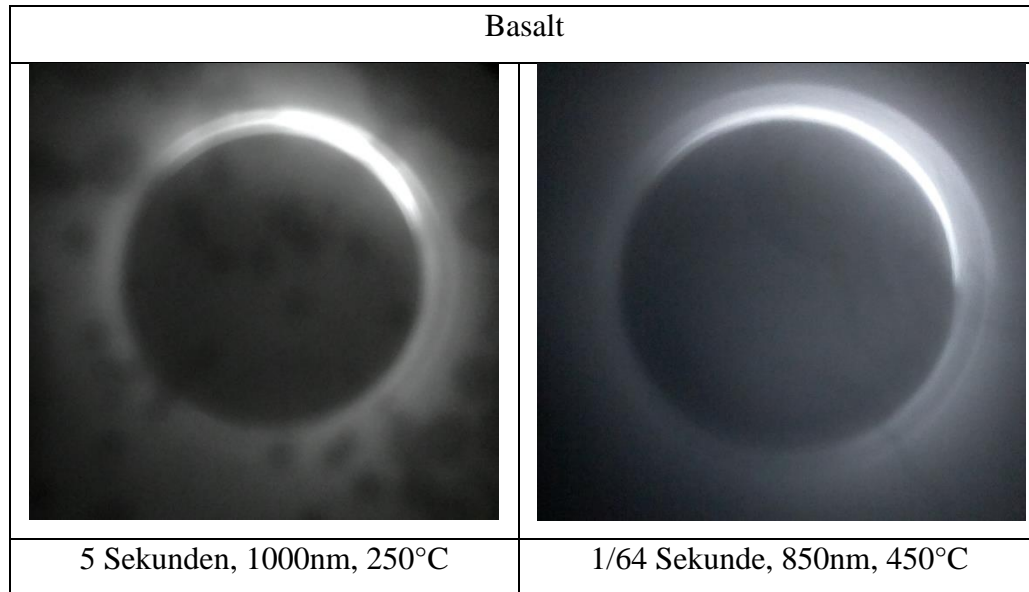
Die automatische Rotation des Karussells wurde nicht genutzt, da die Positionierung durch Reibung nicht zu 100 Prozent zuverlässig ist. Die Positionierung ist jedoch für die Auswertung wichtig, damit Auswertetools immer die gleichen Regionen untersuchen können und so einfache Algorithmen verwendet werden können. Außerdem wurde entschieden, die Temperaturstufen

150°C, 250°C, 350°C und 450°C anzufahren, um das Verhalten der Kamera über die verschiedenen Stufen untersuchen zu können. Die Auswertung wird jedoch nicht im Rahmen der Masterarbeit durchgeführt.

Es wurden zwar auf jedem Temperaturlevel Fotos aufgenommen, doch es wurde für die Auswertung der Aufnahmen bereits eine Vorauswahl unter den aufgenommenen Bildern getroffen. So wurden zum Beispiel Aufnahmen, die unterbelichtet waren, nicht gespeichert. Tabelle 12 zeigt eine Zusammenstellung von Bildern bei unterschiedlichen Temperaturen und Filtern.

Tabelle 12: Bilder des ersten Testzyklus

Schwarzkörper	
	
1/16 Sekunde, 1000nm, 150°C	1/128 Sekunde, 905nm, 350°C
Geteilte Probe	
	
1/16 Sekunde, 850nm, 250°C	1/64 Sekunde, 905nm, 450°C



Die Aufnahmen zeigen deutliche Unterschiede bezüglich der Qualität der Daten und der Aufnahmedauer. Auf den 1000nm Bildern sind Flecken zu erkennen, die sich auf dem Filter befinden, welche bei der Integration der Kamera entstanden sind. Die steigenden Temperaturen führen je nach Konfiguration zu reduzierten Belichtungszeiten bei den Aufnahmen, da ansonsten verstärktes Blooming auftritt. Gut zu erkennen ist der Einfluss des Streulichtes der Probentasse auf die Proben bei den Abbildungen des Schwarzkörpers und der geteilten Probe. Beim Basalt lässt sich eine hellere Fläche auf der Scheibe ausmachen, was die eigentliche Emissionsstrahlung ist. Eine ausführliche Auswertung der Bilder erfolgt in Kapitel 9.

Nachdem der erste Testzyklus abgeschlossen war, ist aufgrund der Ergebnisse eine Modifikation des Testaufbaus beschlossen worden und die Testreihe mit der geteilten Probe erneut durchgeführt worden. Es wurden neue Testkonfigurationen überlegt und ausprobiert, zum Beispiel die Verwendung einer Lochblende, die direkt vor der Kamera positioniert wird oder die Verwendung von einer Blende über der Tasse.

Die Lochblende sollte die Apertur der Kamera so verengen, dass der gesamte Bereich außerhalb der Probentasse ausgeblendet wird. Dadurch würde zwar ein Großteil des Bildes ohne Informationen sein, doch der eigentlich interessante Bereich der Aufnahme würde mehr Graustufen verwenden können. Die speziell dafür angefertigte Lochblende wurde während eines Testlaufs eingesetzt, doch es sind Beugungseffekte aufgetreten, die einen Großteil der Tasse abgedunkelt haben, was den geplanten Nutzen zu stark reduziert hat.

Die Verwendung einer Blende innerhalb der PEL ergab mehrere Lösungsansätze, die folgend kurz erläutert werden.

Die erste Überlegung war es, eine Blende aus schwarz eloxiertem oder anodiertem Aluminium über der Probentasse zu positionieren. Dies ist notwendig, damit die Reflektion der Tasse nicht das eigentliche Signal überstrahlt. Allerdings würde bei dieser Lösung das Sichtfeld der Kamera nicht beschränkt werden, was wieder zu einem Verlust der Graustufen in der eigentlich interessanten Region führen würde. Dementsprechend war der nächste Ansatz die Verwendung eines Rohres, das zusätzlich über der Blende positioniert werden sollte, um den Nachteil zu beseitigen. Allerdings waren diese Konzepte durch die zusätzlich notwendige Fertigung von Komponenten nicht mehr im Rahmen dieser Masterarbeit realisierbar.

Der nächste Ansatz sah die Verwendung einer Blende aus einer nicht reflektierenden Keramik vor, die, ähnlich wie bei dem ersten Konzept, über der Probentasse positioniert werden sollte. Aber auch hierfür war die Fertigungsdauer das Ausschlusskriterium.

Das letzte Konzept sah die Verwendung von einer PTFE-Blende vor. Diese ist nicht reflektierend, hält Temperaturen von bis zu 320 Grad Celsius ohne plastische Verformung stand und war direkt verfügbar. Die Temperatur von 450 Grad Celsius liegt nur bei der Probe an, welche wegen des Vakuums nicht direkt auf das PTFE übertragen wird und somit dort keine negativen Auswirkungen hervorrufen sollte.

Der einfache Aufbau, in Abbildung 39 zu sehen, wurde durch die vorhandenen Materialien bedingt, sodass die PTFE-Blende, gelagert auf einer Blendenschiene aus Kupfer, auf zwei Rundtürmen aus PTFE positioniert wurde. Zusätzliche Blöcke aus PTFE wurden zur Abdeckung der Spalten neben der Blende eingesetzt, um Streulicht zu reduzieren.

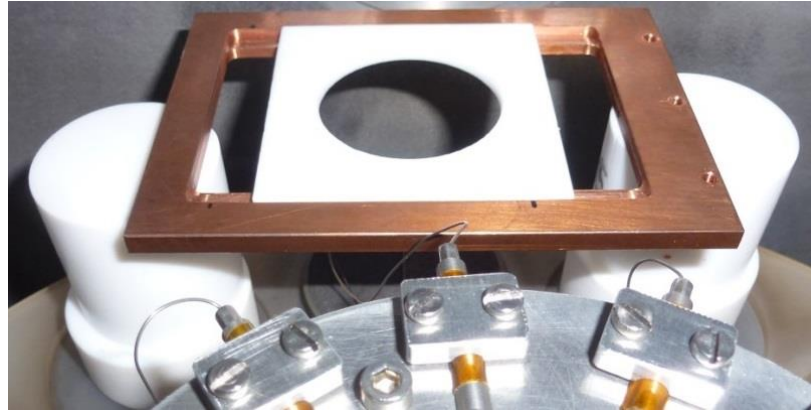


Abbildung 39: PTFE-Blendenkonstruktion im zweiten Testzyklus

Beobachtet wurde wieder die geteilte Tasse, da sich dort die besten Ergebnisse des ersten Testzyklus erzielen ließen, wie in Kapitel 9.1 beschrieben. Die Abbildung 40 zeigt die Probentasse mit den beiden Materialien, links der Schwarzkörper und rechts die Probe, sowie die dazugehörigen Temperatursensoren.

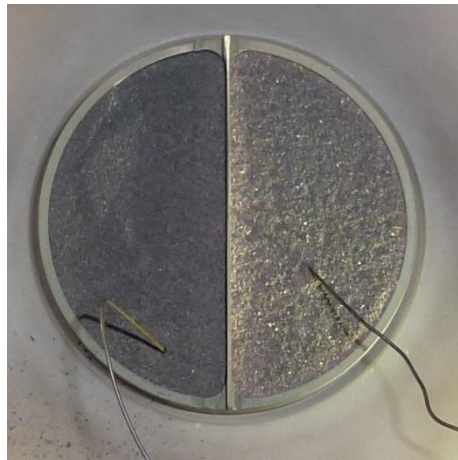


Abbildung 40: Geteilte Probentasse in Testkonfiguration mit Temperatursensoren

Der zweite Test lief analog zum ersten Testzyklus ab, allerdings sind diesmal drei Temperaturen in der Kammer überwacht worden, die Temperatur des Schwarzkörpers (blau), die Temperatur der Probe (rot) und die Temperatur einer PTFE-Säule (grün), um bei Erreichen der kritischen Temperatur für PTFE reagieren zu können (zu sehen in Abbildung 41).

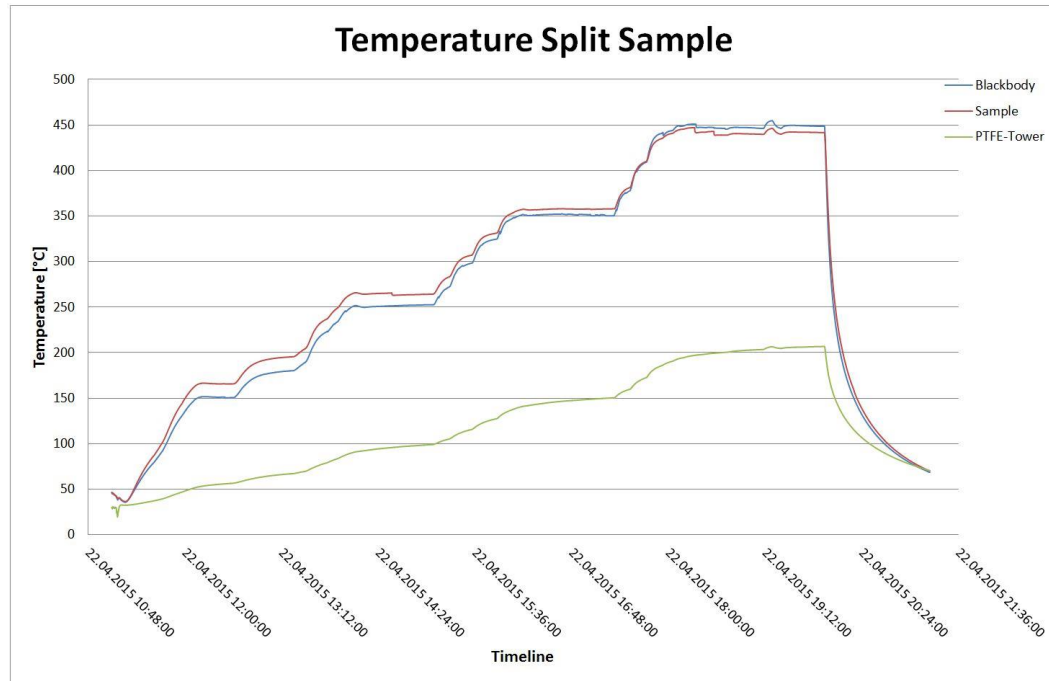
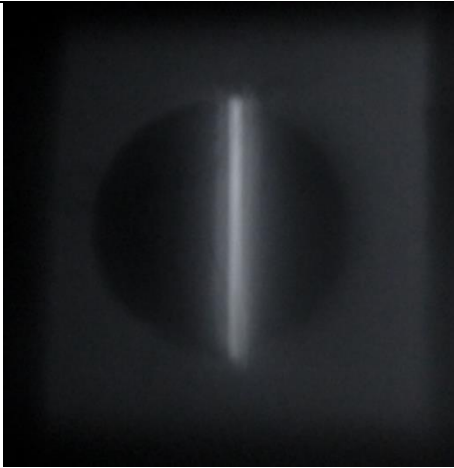
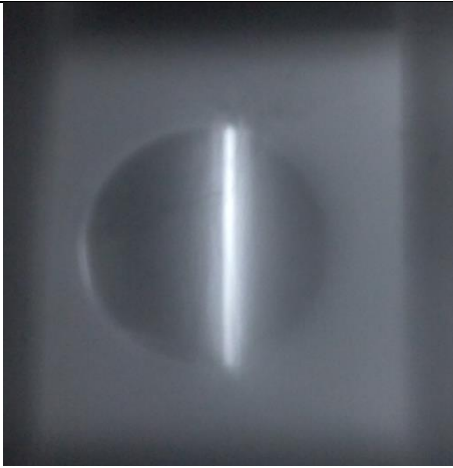
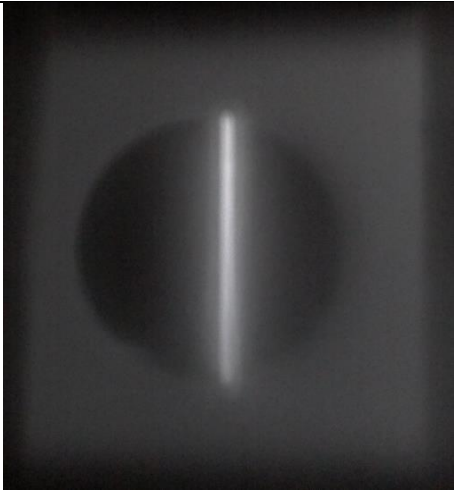
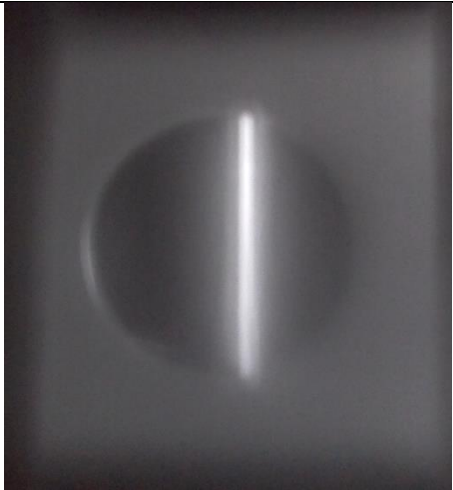
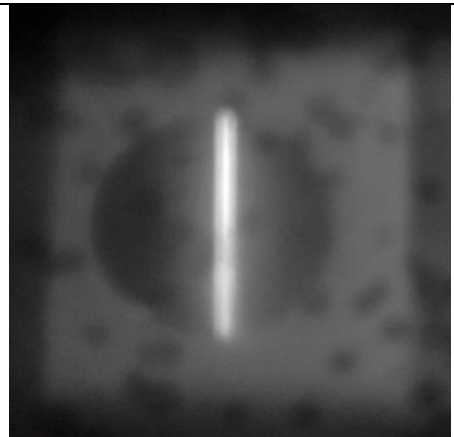
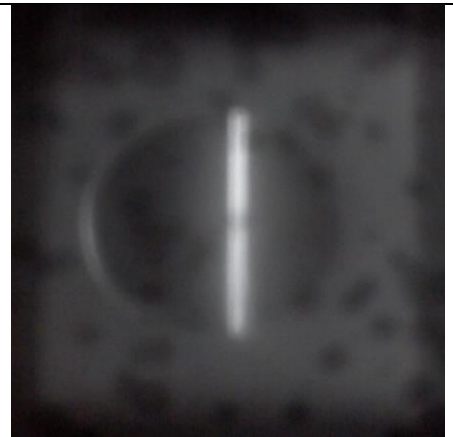


Abbildung 41: Temperaturverlauf der Proben während des zweiten Tests mit der geteilten Probe

Die Temperaturen der Proben unterschieden sich während der gesamten Testdauer, weswegen entschieden worden ist, nur auf den Schwarzkörper zu kalibrieren. Der Grund für den Temperaturunterschied liegt in der Zusammensetzung des Materials, das sich bei hohen Temperaturen unterschiedlich verhält, was einer der Gründe für die Forschungen auf diesem Gebiet ist. Die Temperatur der Kamera verhielt sich analog zu den Temperaturen des ersten Tests.

Tabelle 13 zeigt Bilder der zweiten Testserie. Die verwendete Blende ist deutlich zu erkennen, auch wenn ihre Positionierung nicht optimal mittig ist.

Tabelle 13: Bildauswahl des zweiten Tests mit Blendenkonfiguration

	
6 Sekunden, 850nm, 250°C	1/16 Sekunde, 850nm, 450°C
	
1/8 Sekunde, 905nm, 350°C	1/32 Sekunde, 905nm, 450°C
	
1/4 Sekunde, 1000nm, 350°C	1/32 Sekunde, 1000nm, 450°C

Während der Vorbereitung der zweiten Testkampagne sind Fehler mit der Justierung der Kamera aufgefallen. So zeigte sich, dass die Kamera nun unter einem Winkel sah und somit die Justierung erneut durchgeführt werden musste, was aus konstruktiven Gründen zu diesem Zeitpunkt nicht komplett realisierbar war. Die Gründe für die verloren gegangene Justierung liegen wahrscheinlich in der Verwendung von Teflonband bei den Schellen, die hohen Temperaturen, denen die Kamera ausgesetzt war, sowie das Handling der Kamera, das leichte Stöße und Schocks in die Struktur eingeleitet hat. Aufgrund der bei der Justierung gemachten Erfahrungen kann gesagt werden, dass selbst minimale Änderungen von Winkeln und Positionen enorme Auswirkungen haben, wodurch sich die Abweichungen erklären lassen. Ein Lösungsansatz für dieses Problem wird in Kapitel 10.1 erläutert.

9 Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung der Bilder erfolgte in zwei Phasen, einer Sichtkontrolle und einer daran anschließenden genaueren Auswertung von geeigneten Bildern. Die Sichtkontrolle half, während der Tests eine erste Bewertung der Bilder durchzuführen und Aussagen über die Eignung der Integrationszeit und Testkonfiguration zu treffen. Die explizite Auswertung von ausgewählten Bildern führte zu den Ergebnissen, die am Ende dieses Kapitels präsentiert werden.

9.1 Bewertung der Testkonfigurationen

Die unterschiedlichen Testkonfigurationen waren, durch die bereits mit der PEL am DLR gemachten Tests, vorentschieden worden, wobei die ungeteilte Tasse als beste Konfiguration galt. Die anderen Konfigurationen waren als eher unwahrscheinliche Alternativen erachtet worden, insbesondere die Konfiguration mit der Basaltscheibe, die aufgrund der zumeist pulverförmig vorliegenden Materialien als Ausnahme untersucht wurde.

Die Konfiguration mit der vollen Tasse, die einen Durchmesser von 55mm mit einem Rand von 2 mm Stärke hat, ist für die Untersuchung mit einem Spektrometer, das die Messung über die gesamte Fläche der Tasse durchführt, am besten geeignet, da dort die Strahlung der Tasse durch die Messung nicht nachteilig erfasst wird. Bei der Aufnahme eines Bildes mit einer abbildenden Kamera ist dies ein Problem, da die Tasse heller abstrahlt als die Probe. Dies resultiert aus der Tatsache, dass die Temperatur der Tasse nicht mit überwacht wird, da die Temperatur der Probe als Referenz genutzt wird. Da die Tests im Vakuum stattfinden, muss die Wärme der Tasse durch

Wärmeleitung in das Probenmaterial eingeleitet werden, was erfahrungsgemäß etwas dauert. Bis die Zieltemperatur jedoch erreicht ist, wird viel Wärme durch Konvektion abgestrahlt und geht somit der Probe verloren. Um also die gewünschte Temperatur der Probe zu erhalten, muss die Tasse eine deutlich höhere Temperatur besitzen, um die Verluste auszugleichen. Dies führt dazu, dass die Tasse im Verhältnis eine höhere Strahlleistung im optischen Bereich erreicht und somit die Probe größtenteils überstrahlt.

Um dieses Problem zu umgehen, muss der Bloomingeffekt – das Auslaufen der Pixel durch eine zu hohe Integrationszeit – der am Detektor durch die Tasse hervorgerufen wird, minimiert werden. Durch Verkürzung der Integrationszeit, was zu einem insgesamt dunkleren Bild führt, kann dieser Effekt verringert werden, sodass er die Bildinformationen nicht länger negativ beeinflusst. Doch selbst durch diese Maßnahme sind die Bilder ungeeignet, da keine verlässliche Aussage über die Bildinformationen gegeben werden kann. Der Grund dafür liegt an der Anzahl der Graustufen, die durch die Auflösung limitiert ist. Diese werden anhand der Bildinformationen vergeben, was bedeutet, dass das hellste Pixel den höchsten Graustufenwert bekommt und anhand dessen das gesamte Bild skaliert wird. Somit ist für diesen Test zwar eine Aussage über die Strahlleistung des Materials möglich, jedoch kann keine Aussage in Bezug auf eine Referenzprobe getroffen werden, da die Strahlleistung der Tasse bei Messung des Referenzmaterials genau die identische Graustufenskalierung aufweisen müsste. Dies ist jedoch aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen der Tasse, die nötig sind, um verschiedene Materialien auf die gleiche Temperatur zu erwärmen, nahezu unmöglich zu realisieren.

Die Konfiguration mit der Basaltscheibe hat das Problem mit der überstrahlenden Tasse zwar nicht, da die Trägerscheibe komplett von dem Basalt verdeckt werden kann, doch auch hier wird Streulicht von der Scheibe abgestrahlt, was allerdings nur für eine indirekte Beleuchtung der Umgebung sorgt. Dies ist insofern ein Problem, als dass die beleuchtete Fläche wieder den hellsten Punkt des Bildes liefert. Aber auch bei der Basaltscheibe existiert die Problematik, dass sie nicht in ein geeignetes Verhältnis gesetzt werden kann, da wieder andere Materialien andere Temperaturen der Scheibe und damit unterschiedliche Helligkeitsstufen aufweisen würden. Allerdings konnte man auf den Fotos bereits mit bloßem Auge Strahlung auf der Scheibe erkennen, da unterschiedliche Graustufen auf der Oberfläche der Scheibe zu erkennen waren, was zeigt, dass das Prinzip der Kamera funktioniert. Dies wird auf Abbildung 42 deutlich. Der helle

Streifen ist die Scheibe, die während der Testphase durch das Abpumpen der Luft leicht aus der optimalen Positionierung unterhalb der Basaltscheibe ausgewandert ist.



Abbildung 42: Basaltscheibe mit erkennbarem Signal auf der Oberfläche

Es bestand die Überlegung, eine Hälfte des Basalts durch einen anderen Basalt zu ersetzen, doch da es keine geeignete, temperaturbeständige Verbindung gibt, die das Messresultat nicht beeinflussen würde, ist diese Idee wieder verworfen worden. Auch die Positionierung von pulverförmigem Material auf der Basaltoberfläche ist durch die ungeeignete Wärmeübertragung als nicht optimal verworfen worden.

Die dritte Konfiguration ist eine geteilte Tasse (siehe Abbildung 40), die wie die Standardtasse aufgebaut ist, jedoch über einen 0,5mm breiten Steg verfügt, welcher mittig die Tasse halbiert. Dadurch gibt es wieder die Blooming-Problematik der Standardtasse, doch diesmal sind zwei Materialien in einem Bild, die der gleichen Skalierung unterliegen. Durch die Tatsache, dass es sich bei dem einen Material um den Referenzschwarzkörper handelt, kann auch eine Auswertung vorgenommen werden, die vergleichbare Aussagen mit den Ergebnissen der bisherigen Spektromettermessungen zulässt. Somit ist die geteilte Tasse als einzige Konfiguration qualifiziert, repräsentative Ergebnisse zu liefern.

9.2 Die Auswertung der Aufnahmen der geteilten Probe

Die Auswertung der Bilder war nach Abschluss der Testkampagnen der nächste Bearbeitungsschritt dieser Masterarbeit. Da es sich bei den Bildern um PNG-Aufnahmen handelt, was in Kapitel 6.2 bereits erläutert worden ist, ist es möglich, das Bild in einem der Rohdaten sehr ähnlichen Zustand zu untersuchen. Nach der Vorauswahl der Bilder, die durch die sichtbaren

Ergebnisse getroffen wurde, also nach dem Kriterium, dass nahezu kein Blooming-Effekt bei der größtmöglichen Belichtungszeit auftritt, konnten die Bildauswertungsprogramme verwendet werden.

Die erste Stufe der Auswertung wurde mit Hilfe des Programms GIMP durchgeführt. Dazu wurde das Bild temporär von einem Farbbild in Graustufen umgewandelt und die interessanten Regionen, also die Gebiete innerhalb der Tasse, näher betrachtet. Da dieses Programm pixelweise die Graustufen anzeigen kann, konnte ein Großteil der Aufnahmen, die in der ersten Betrachtung als potentiell geeignet erschienen, in dieser Auswertungsstufe bereits ausgeschlossen werden, da sie nahezu keine Unterschiede zwischen den Emissionsflächen der zwei Proben einer Tasse zeigten.

Bei der zweiten Bildauswertungsstufe wurden die durch Nutzung von GIMP bereits vorausgewählten Aufnahmen in einem Pythonprogramm weiterverarbeitet, welches bereits seitens des DLR-Mitarbeiters Mario D'Amore entwickelt wurde und für diese Masterarbeit zur Verfügung stand.

Der Ablauf der Bildprozessierung ist hierbei im Wesentlichen in drei Stufen unterteilt. Die erste Stufe liest das Bild, hier ein 905nm Bild bei 450°C, ein und erzeugt aus diesem ein Falschfarbenbild (siehe Abbildung 43).

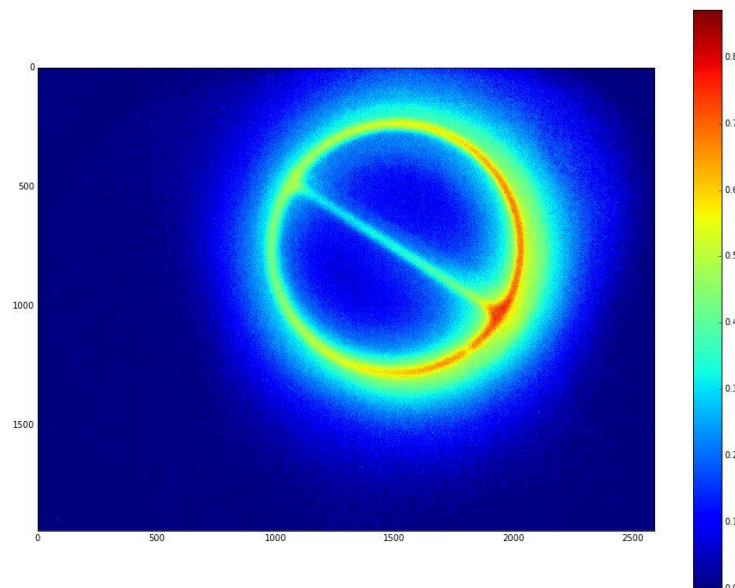


Abbildung 43: Falschfarbenbild nach der ersten Prozessierungsstufe

Danach erfolgt die Segmentierung des Bildes, das heißt, dass zuerst die Verteilung der unterschiedlichen Graustufen ermittelt wird und anschließend die Regionen von Interesse definiert werden. Dafür werden eine obere sowie eine untere Grenze der zulässigen Graustufen definiert, die im Zielgebiet vorherrschen. Danach wird ein neues Graustufenbild generiert, dessen Skalierung nun nur noch Graustufen innerhalb der zulässigen Grenzen aufweist und das als Maske dient, um im Originalbild den zur weiteren Untersuchung interessanten Bereich zu definieren. Alle anderen Gebiete des Ursprungsbildes werden in dieser Maske verworfen. Abbildung 44 zeigt die Segmentierung und die definierten Regionen des prozessierten Bildes.

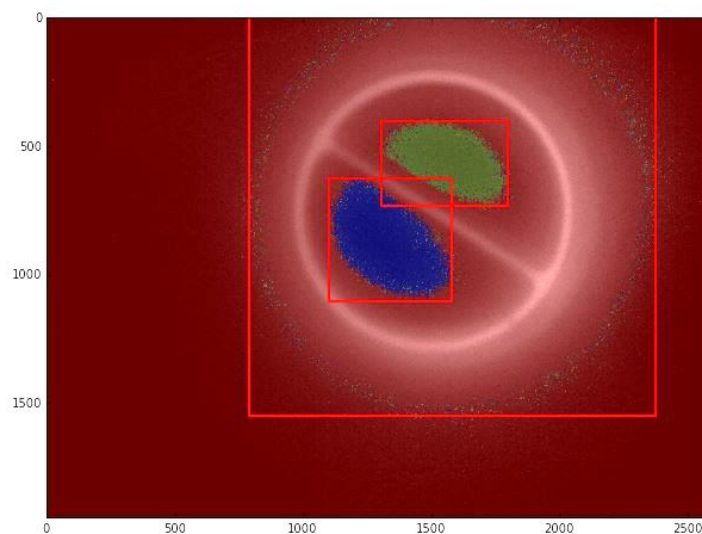


Abbildung 44: Segmentierung des Bildes und Definition von interessanten Regionen durch Auswertung der Graustufenverteilung

Nach der Segmentierung kann dann mit den erstellten Suchmasken das Originalbild betrachtet und die Verteilung der Pixelwerte in den definierten Graustufen bestimmt werden (siehe Abbildung 45). Die aus den Histogrammen resultierenden Häufigkeiten von Pixelwerten bilden dann die Grundlage für die Berechnung der zur Emissivitätsbestimmung notwendigen Werte wie zum Beispiel dem mittleren Helligkeitswert. Eine unterschiedliche Verteilung der Graustufen zwischen den beiden untersuchten Materialien deutet dabei auf einen Erfolg der Messung und damit auf eine Eignung der Kamera hin.

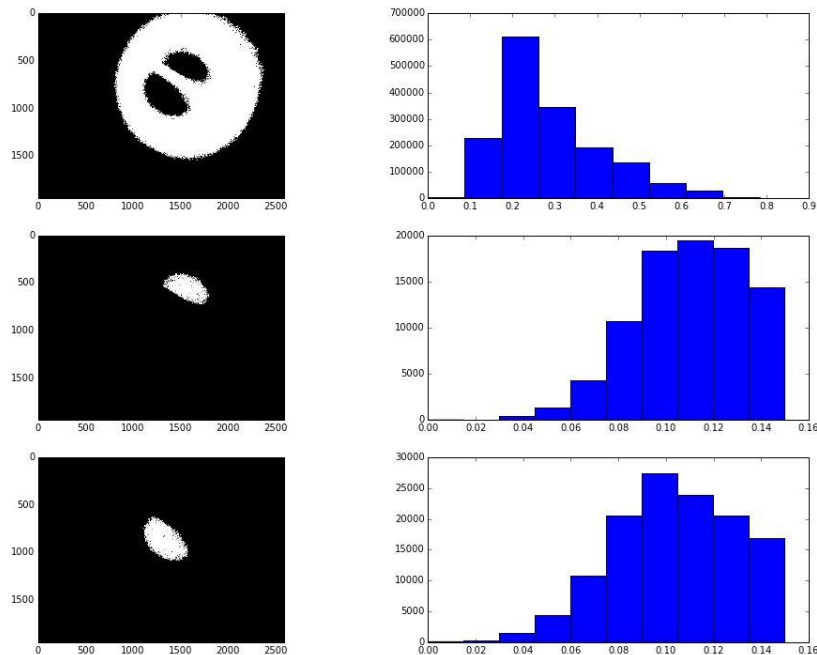


Abbildung 45: Verteilung der Pixelwerte über der Aufnahme beim ersten Test

Der Schwarzkörper, die blaue Region in Abbildung 44, erscheint etwas heller als die grüne Region der Probe, was auf einen Unterschied in der Emissivität schließen lässt. Die Anzahl der Pixel im betrachteten Bereich ist beim blauen Bereich größer, doch durch Berechnung des Mittelwertes und des Medians wird deutlich, dass die Fläche insgesamt dunkler ist. Dies resultiert aus einem Logikfehler im Auswerteprogramm, weswegen die Helligkeitswerte vor Berechnung der Emissivität invertiert werden müssen.

Die folgende Formel zeigt die prozentuale Berechnung der Emissivität der schwächeren Probe im Vergleich zum Schwarzkörper aus den invertierten Werten dieser Aufnahme.

$$Emissivität [\%] = \frac{\text{Median der Graustufen des Probenmaterials}}{\text{Median der Graustufen des Schwarzkörpers}} = \frac{0,104193}{0,111753} = 93,235\%$$

Das Verhältnis der Werte von Probe zu Schwarzkörper ergibt einen Wert von ungefähr 93%, was bedeutet, dass die Probe etwa 7% weniger als der Schwarzkörper emittiert.

Als letzter Schritt der Auswertung muss das Ergebnis der Messung, zusammen mit den anderen beiden Filtern, mit den vorliegenden Spektrometerdaten der Probe verglichen werden, um abschließende Aussagen über die Qualität der Kamera treffen zu können. Die Messungen mit

dem Spektrometer ergeben die Reflektanz des jeweiligen Materials in Prozent, welche durch die Formel

$$1 - \text{Reflektanz} = \text{Emissivität}$$

umgerechnet werden kann (Wolfe, Transmission, Reflection, Emission and Absorption, 1998). Diese Emissivitätswerte müssen dann noch ins Verhältnis zueinander gesetzt werden, um den Unterschied der Emissivität der schwächeren Probe zum Schwarzkörper in Prozent ausdrücken zu können. Die resultierenden Emissivitätswerte sollten, bis auf minimale Messfehler, identische Werte wie die mit der Kamera durchgeführten Emissionsmessungen ergeben. Die Grundlagen der Spektrometermessungen können in der Publikation “Komatiites as Mercury surface analogues: Spectral measurements at PEL” (Maturilli et al, 2014) nachgelesen werden. Die vorliegenden Kurven des Spektrometers für die von der Kamera ebenfalls aufgenommene geteilte Probe (siehe Abbildung 46) unterstützen die Werte der Kamera, da für die hier berechnete Emissivität von Komatiit in Bezug auf den Schwarzkörper bei 905nm ein Wert von 93,5% bestimmt worden ist.

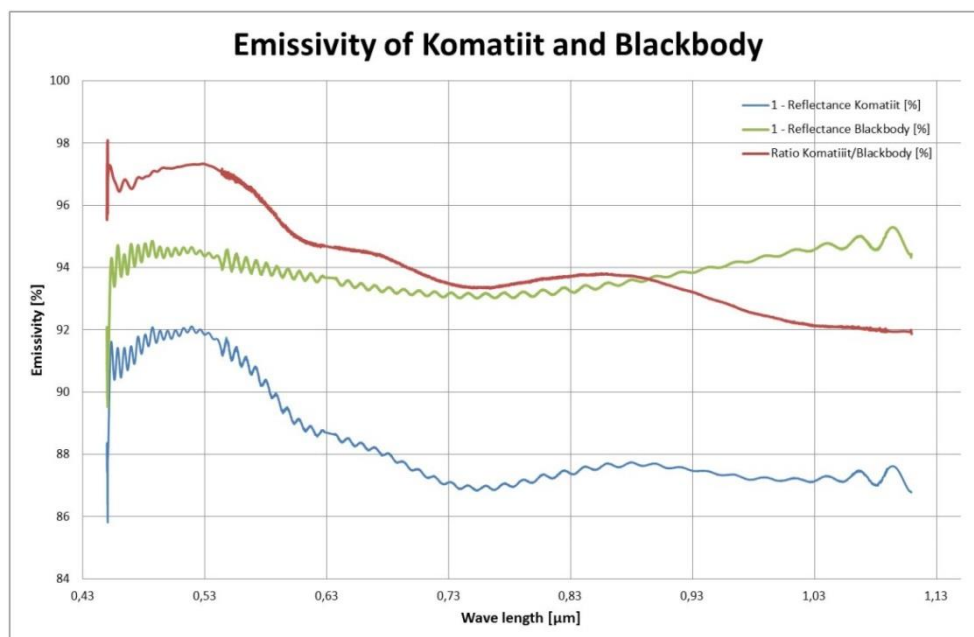


Abbildung 46: Umgerechnete Reflektanzmessungen der Materialien aus Spektrometermessungen

Die Ergebnisse für alle drei Filter sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Emissivität von Komatiit bezogen auf den Schwarzkörper gemessen mit der VEM Kamera und dem Spektrometer nach dem ersten Test

Emissivität	Filterwellenlänge [nm]		
	850	905	1000
Emissivität von Komatiit bezogen auf Schwarzkörper (nach Kamera) [%]	97,115	93,235	71,847
Emissivität von Komatiit bezogen auf Schwarzkörper (nach Spektrometer) [%]	93,765	93,491	92,367
Differenz Spektrometer – Kamera [%]	3,350	0,256	20,520

Die Kamera liefert für den 850nm und den 905nm Kanal gute Ergebnisse mit einer Abweichung von unter fünf Prozent von den Referenzwerten des Spektrometers, was für die ersten Messungen mit dem Entwicklungsmodell einen guten Wert darstellt. Durch die bereits genannte Verschmutzung liefert der 1000nm Filter ungeeignete Werte, da die Flecken des Filters die Verteilung der Pixel in den verschiedenen Graustufen nachteilig beeinflussen. Eine Flatfield-Aufnahme, die Aufnahme eines gleichförmigen Bildes für Korrekturberechnungen, könnte den Fehler zwar minimieren, doch nicht insgesamt beseitigen.

Auch die Nutzung von überlagerten Bildern in den jeweiligen Spektralbändern würde die Bildqualität nicht wesentlich verbessern, da die Bandbreite der Graustufen in den interessanten Regionen zu gering ist, als dass es einen deutlichen Einfluss auf die Qualität hätte. Überlagerte Bilder würden zwar durch gemittelte Pixelwerte weniger Rauschen enthalten, doch andererseits könnten die minimalen Unterschiede eventuell dadurch überlagert werden und somit das Signal abschwächen.

Trotzdem kann bereits nach diesem ersten Test gesagt werden, dass das Prinzip von VEM mit dem gewählten Optikdesign nicht nur funktioniert und nachgewiesen werden konnte, sondern dass auch der Low-Cost-Ansatz mit dem Raspberry Pi zu wissenschaftlich nutzbaren Daten führt.

9.3 Auswertung der Aufnahmen der geteilten Probe der zweiten Testkampagne

Die Ergebnisse der ersten Testkampagne zeigten, dass die Probentassen das eigentliche Ziel der Kamera, die Detektion der Emission der Probe, stark negativ beeinflussten und durch Überstrahlen das Signal reduzierten. Weiterhin ist durch den großen Öffnungswinkel der Kamera, resultierend aus den Anforderungen von VEM (vgl. Kapitel 2.4), ein großer Bereich außerhalb der Tasse aufgenommen worden, was die Anzahl der Graustufen für das eigentliche Zielgebiet

reduziert hat. Dadurch wurde das Signal-zu-Rausch-Verhältnis nachteilig beeinflusst, sodass das Signal im Verhältnis zur restlichen Strahlung in den Hintergrund getreten ist. Weiterhin zeigten die Aufnahmen nur geringe Unterschiede aufgrund der durch die 8-Bit begrenzten 256 Graustufen, weswegen entschieden wurde, die Auflösung auf 10-Bit, also 1024 Graustufen, zu erhöhen, damit der Unterschied deutlicher herauskommt. Dies wird durch die Verwendung der Rohdaten der Kamera erreicht, was in dem ersten Testlauf noch nicht angewendet wurde.

Die Ergebnisse des zweiten Tests waren trotz der Änderungen im Testaufbau nicht so gut wie erwartet, da die diffuse Beleuchtung des PTFEs für eine relativ gleichmäßige Beleuchtung über das gesamte Bild gesorgt hat. Der Blooming-Effekt wurde zwar deutlich reduziert, doch die diffuse Beleuchtung führte dazu, dass das Signal der Probe im allgemeinen Rauschen größtenteils unterging und sich somit die Detektion als sehr schwierig erwies. Dies kann bereits in Tabelle 13 anhand der Aufnahmen vermutet werden. Abbildung 47 zeigt die Verteilung der Pixelwerte und Segmentierung in der zweiten Konfiguration bei 450 Grad Celsius und dem 905nm Filter. Es ist auch deutlich die ungleichmäßige Positionierung der Blende und damit die Verringerung des Signals der einen Probenhälfte zu erkennen.

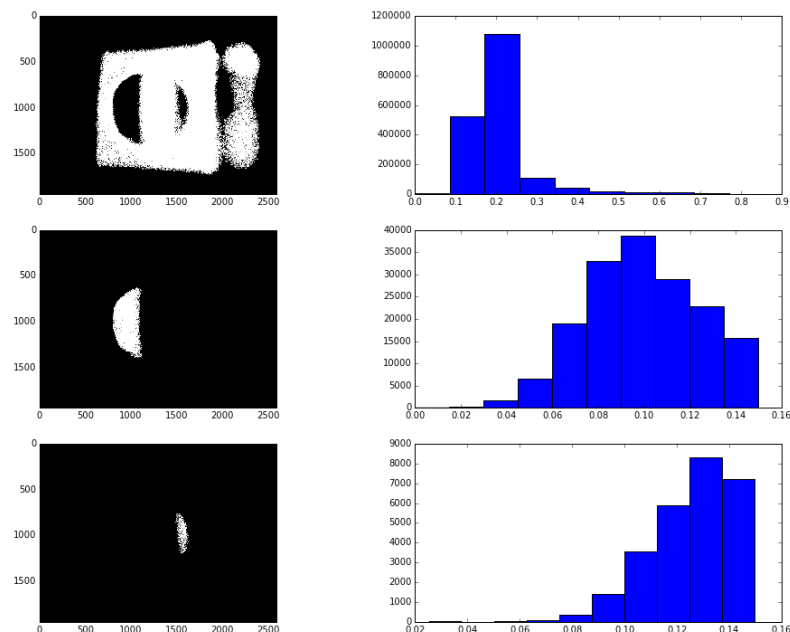


Abbildung 47: Verteilung der Pixelwerte über der Aufnahme beim zweiten Test

Die Auswertung bestätigte die ersten Eindrücke, da bei den 8-Bit-Bildern nur minimale Unterschiede ausgemacht werden konnten. Das eigentliche Problem der Aufnahme ist, dass die

Verteilung der Graustufen sehr schlecht ist, wodurch die Differenzierung zusätzlich erschwert wird. Die Prozessierung der 10-Bit-Bilder wurde im Rahmen der Arbeit nicht mehr durchgeführt, weswegen der Einfluss der diffusen Strahlung auf die 10-Bit-Bilder nicht untersucht werden konnte. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Emissivität von Komatiit bezogen auf den Schwarzkörper gemessen mit der VEM Kamera und dem Spektrometer nach dem zweiten Test

Emissivität	Filterwellenlänge [nm]		
	850	905	1000
Emissivität von Komatiit bezogen auf Schwarzkörper (nach Kamera) [%]	69,729	78,871	51,695
Emissivität von Komatiit bezogen auf Schwarzkörper (nach Spektrometer) [%]	93,765	93,491	92,367
Differenz Spektrometer – Kamera [%]	24,036	14,620	40,672

Der Fehler zwischen den Kamera- und den Spektromettermessungen ist deutlich höher und die gemessenen Emissivitäten schlechter. Dies liegt nicht nur an der Konfiguration mit der nicht optimal positionierten Blende, sondern auch an der Definition der Probenregionen, da diese manuell eingestellt werden müssen und dabei potentielle Fehler entstehen können. Somit kann gesagt werden, dass die Nutzung der Testkonfiguration aus der ersten Testkampagne zu deutlichen besseren Ergebnissen geführt hat und die Konfiguration mit der Blende erst dann eine Verbesserung der Ergebnisse zulassen wird, wenn ein Blendenmaterial gefunden wird, dass durch eine sehr geringe Reflektanz das allgemeine Rauschen des Bildes nicht noch zusätzlich erhöht, sondern das Hervorheben des Probensignals allein unterstützt.

9.4 Einfluss der Temperatur auf die Messungen

Die Aufnahmen der unterschiedlichen Temperaturebenen des Probenmaterials sind durchgeführt worden, um eine Untersuchung einer möglichen temperaturabhängigen Verschiebung der Emissivitätswerte zu ermöglichen. Die gewonnenen Aufnahmen werden zu diesem Zweck archiviert und müssten für jede Temperaturstufe einzeln nach dem Schema ausgewertet werden, dass in Kapitel 9.2 beschrieben wurde. Eine solche Untersuchung ist jedoch nicht Teil der Masterarbeit und wird daher an dieser Stelle auch nicht näher analysiert.

Der Einfluss der Temperatur der PEL auf die Kamera ist laut Hersteller des CMOS-Chips bis zu einer Temperatur von 50°C noch nicht problematisch, da bis dahin mit keinen negativen Auswirkungen auf die Bildqualität der Kamera zu rechnen ist. Die Höchsttemperaturen des

CMOS-Chips während der Tests lagen bei ungefähr 49 Grad Celsius, was also knapp unter der spezifizierten Grenztemperatur lag. Allerdings wird sich dennoch der Dunkelstrom der Bilder bei einer Temperaturerhöhung des Chips von Raumtemperatur auf 49°C erhöht haben, was sich wiederum in der Bildqualität niedergeschlagen haben wird. Dies zu überprüfen ist jedoch mit dem aktuellen Testaufbau nicht möglich. Mögliche Modifikationen, um den Temperatureinfluss zu reduzieren, finden sich in Kapitel 10.3.

10 Optimierungspotenzial des Designs des Entwicklungsmodells sowie des Testaufbaus

Da es sich bei der Masterarbeit um eine Neuentwicklung einer IR-Kamera handelt, gibt es entsprechend viele Designänderungs- und Optimierungsmöglichkeiten. Die anfänglich als optimal angesehenen Designlösungen haben zum Teil, durch den Einsatz oder durch das Handling der Kamera, neue Lösungsansätze und Verbesserungsvorschläge eröffnet. Um die Ergebnisse der Kamera weiter zu verbessern, sollten die im Folgenden erläuterten und diskutierten Vorschläge bei weiterführenden Modellen mit berücksichtigt werden.

10.1 Optimierungspotenzial der Konstruktion

Durch die während der Integration und Testphase gesammelten Erfahrungen mit der bei dieser Masterarbeit neu entwickelten IR-Kamera wurde klar, dass das Optimierungspotenzial der Konstruktion neben den möglichen Änderungen am Testaufbau am größten ist.

Die Struktur der Kamera hat sich prinzipiell als sehr praktisch herausgestellt, da sie sehr einfach zusammengebaut werden kann und gleichzeitig die Anforderung hinsichtlich der Lichtdichtheit erfüllt. Allerdings ist die Kamera mit einer Masse von fast 4,5 Kilogramm sehr schwer, wovon die Strukturteile mit 3,1 Kilogramm den größten Anteil ausmachen. Um die Masse zu reduzieren wäre es möglich, die Struktur, sofern es die jeweilige Seitenwand zulässt, auszufräsen und so eine Masseeinsparung von 30 bis 40 % zu erzielen, was einer Massereduktion von ca. 1,9 - 2,2 Kilogramm entsprechen würde.

Weiterhin sollte das momentane Konzept der Winkelwürfel (siehe Abbildung 20), die aufgrund ihrer filigranen Struktur in der Fertigung zu Problemen geführt haben, überdacht werden. Die Würfel resultieren aus den ersten Konzepten mit einer sehr geringen Wandstärke, was sich nun

geändert hat. Die Verschraubung kann unter Umständen direkt in den Gehäusewänden durchgeführt werden, ohne dabei die Lichtdichtheit zu beeinträchtigen.

Die aktuelle Konfiguration des Dichtrings außen an der Kamera, zu sehen in Abbildung 35, hat sich als problematisch erwiesen. Ursprünglich war es geplant, den Dichtring zur Hälfte in der Kamerastruktur einzukleben und der Rest sollte durch das Gewicht der Kamera flach auf der PEL angepresst werden, sodass nahezu kein Spalt zwischen Kamera und PEL übrig bleibt, aber durch die Verwendung eines zu starren Dichtringmaterials ist dies nicht der Fall. Auch sollte die Fassung des O-Rings in der Frontplatte der Ringdicke angepasst werden, das heißt die Ausfräsung muss tiefer und breiter werden, um Raum für den gestauchten Ring zu schaffen. Optional wäre auch ein Flachdichtring möglich.

Die Optik hat ebenfalls Potenzial für Verbesserungen an allen Komponenten offenbart, sowohl an der Telezentrik, dem Filterrad als auch an der Relaisoptik (vgl. Abbildung 10). So sollte zu Beginn eine Justierung der Kameraoptik mit einem Laser erfolgen, um möglichst kleine Abweichungen von der optischen Ideallinie zu detektieren und somit eine möglichst genaue Fokussierung zu erlangen. Dies würde zusätzlich ein PSF-Bild generieren, was der Bewertung der Bildqualität dienen würde.

Die Telezentrik ist, durch die Möglichkeit der Justierung direkt an der Telezentrik selbst, nicht zwangsweise auf einen optischen Tisch angewiesen, was eine Masseeinsparung von ca. 0,23 Kilogramm bedeuten würde. Auch die Überarbeitung der Schellen (siehe Abbildung 22) ist notwendig, da sich während der Testphase, wie bereits in Kapitel 8 beschrieben, die Justierung durch das Handling und die Temperatur der Struktur deutlich verändert hat. Um dem entgegenzuwirken ist als Lösungskonzept wieder eine Schelle vorgesehen, doch diesmal mit acht Schrauben zur Fixierung (anstelle des Teflonbandes), die im Abstand von 45 Grad um die Telezentrik verlaufen. So kann die Positionierung genauer und reproduzierbarer eingestellt werden.

Für die Relaisoptik gilt ebenfalls, dass die Schelle, analog zur Telezentrik, überarbeitet werden muss, um eine bessere Justierung zu ermöglichen. Außerdem muss der Bauraum für die Integration der Halterung auf dem optischen Tisch korrigiert werden, da momentan kein Werkzeug effektiv zur Befestigung der Schelle eingesetzt werden kann.

Wie bereits in Kapitel 5.2.2 angesprochen, hat das Filterrada ein großes Potenzial für Verbesserungen. Dies sind der Einbau eines Motors zur automatischen Änderung des Filters, die Verwendung eines kleineren Filterrades oder weiterer Filter im Filterrada, sowie der Austausch des 1000nm Filters, der durch unkorrekte Lagerung und Handling Flecken auf der Filterlinse aufweist.

Der Motor ist insofern interessant, als dass die Kamera nicht mehr für den Wechsel des Filters im optischen Strahlengang geöffnet werden müsste, sondern nur noch mit Hilfe von Befehlen gesteuert werden könnte. Die Verwendung und der Bauraum eines Motors, der parallel zur Rotationsachse eingebaut werden müsste, sind durch die Verwendung eines Standardzahnrades möglich. Die Herausforderung würde hierbei in der Motorsteuerung und der Positionierung des Zahnrades liegen, da die Ansteuerung mit Hilfe der GPIO-Ports des Raspberry Pi erfolgen müsste.

Eine weitere Option wäre die Verwendung eines kleineren Zahnrades, da das momentane Zahnrad für die Anzahl der Filter überdimensioniert und dadurch zu massereich ist. Sollte die Baugröße nicht problematisch sein, so wäre die Verwendung weiterer Filter, maximal sieben Filter plus einen sichtbaren Kanal, anzuraten, um das Potential der Kamera zu erweitern.

Für die weitere Verwendung der Kamera ist auf jeden Fall der Austausch des 1000nm Filters unerlässlich, da die Flecken auf dem Filter zu einem schlechteren Bild führen. Man kann diesen Fehler zwar durch die Verwendung einer Flatfield-Aufnahme herausrechnen, doch da das zu detektierende Signal an sich schon schwach ist, sollte die Hardware die bestmögliche Qualität liefern.

Die Temperaturkontrolle ist in der bestehenden Version passiv ausgelegt und wird an mehreren Punkten durch Temperatursensoren erfasst. Als Verbesserungsvorschlag gibt es zwei Ansätze, eine passive sowie eine aktive Temperaturregelung.

Die passive Kühlung in der vorliegenden Konfiguration ist nicht effektiv genug, um die entstehende Temperatur effizient abzutransportieren. Momentan wird versucht, die gesamte Hitze des Systems über den Raspberry Pi Halter an die Bodenplatte und von dort in die Gehäusestruktur zu leiten und so eine ausreichende Kühlung zu erreichen. Besser wäre es jedoch, die Kupferplatte des Raspberry Pi direkt an die Rückwand der Kamera anzuschließen. Dazu

müsste ein weiteres Kupferblech großflächig mit Wärmeleitpaste an die Wand gekoppelt werden. Das gleiche sollte mit der RaspiCam passieren, sodass die Temperatur besser abgeführt und verteilt werden kann.

Die aktive Kühlung hingegen würde dieses Problem, bei Verwendung von geeigneten Kühlelementen, umgehen und für eine konstantere Temperatur sorgen. Geeignete Kühlelemente wären zum Beispiel Wärmerohre (heat pipes), Peltier-Elemente oder eine Flüssigkeitskühlung, was allerdings einen größeren konstruktiven Mehraufwand bedeuten würde. Allerdings könnte eine gewünschte Temperatur, optimaler Weise zwischen 0 und +10 Grad Celsius für einen geringen Dunkelstrom, eingestellt werden. Hierfür bedarf es dann jedoch auch der Programmierung einer aktiven Temperaturregelung.

Die Problematik Streulicht innerhalb der Kamera ist durch die Lichtdichtheit der Struktur und die geringen Belichtungszeiten kaum relevant, doch bei dunklen Langzeitaufnahmen, sogenannten dark frames, kann dennoch minimales Streulicht detektiert werden. Die Quellen dafür liegen unter anderem am Raspberry Pi, dessen LEDs im Betrieb leuchten und an den Kommunikationsports, die aufgrund ihres Gehäuses nicht perfekt lichtdicht sind. Die LEDs und Ports sind zwar abgeklebt, doch trotzdem kommt ein schwacher Lichtschein hindurch, der auf den dark frames detektiert werden könnte. Eine bessere Abdeckung, zum Beispiel mit Scotch-Weld, könnte dieses Streulicht reduzieren. Weiterhin ist die Kamerastruktur an sich reflektierend, was die Weiterleitung von Streulicht ermöglicht. Durch die Verwendung von schwarz anodiertem oder eloxiertem Aluminium auf den inneren Seitenwänden der Struktur kann der Streulichteinfluss weiter minimiert werden, was letztendlich die Bildqualität erhöht, da dies zu einem besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnis führt.

Ein optionaler Punkt für Verbesserungen der Struktur wäre die Verwendung eines alleinigen Schnittstellenports sowohl für die Kommunikation als auch für die Stromversorgung des Raspberry Pi anstatt der momentanen Lösung mit zwei Ports. Außerdem sollte für die Fehlersuche innerhalb der Programmierung über ein Herausführen des HDMI-Anschlusses aus der Kamerastruktur nachgedacht werden, da dieser für diese Aufgabe unerlässlich ist.

10.2 Optimierungspotenzial der Programmierung

Die Programmierung, die während dieser Masterarbeit durchgeführt wurde, ist inhaltlich abgeschlossen, doch für eine einfachere Bedienung durch Benutzer wären einige Verbesserungen möglich.

Das Hauptprogramm, wie in Abbildung 27 dargestellt, sollte in einem Programm zusammengefasst werden und automatisiert ablaufen. Um dies zu realisieren, müsste eine Interruptsteuerung implementiert werden, die interne Interrupts nutzt, um keine zusätzlichen Anbauten am Raspberry Pi anschließen zu müssen. Da dies während der Arbeit bereits versucht worden ist, kann gesagt werden, dass es in der momentanen Konfiguration des Raspberry Pi nicht möglich ist, interne Interrupts zu verwenden. Nach eingehender Recherche für Lösungen ist nur der fork-Prozess gefunden worden, der jedoch aufgrund der begrenzten Bearbeitungszeit der Masterarbeit nicht mehr implementiert werden konnte. Dieser Prozess erzeugt einen Kindprozess, der bei Aufruf den gewünschten Befehl ausführt, in diesem Fall wäre das die Aufnahme von Bildern. So würde als Hauptprogramm weiterhin die Temperaturerfassung laufen, bei Bedarf jedoch automatisiert ein Unterprogramm ausgeführt werden. Dies würde das Abbrechen des laufenden Programms vermeiden und somit für ein stabileres Programm sorgen.

Als eine weitere Verbesserung wäre es möglich, das Raspberry Pi als Webserver aufzusetzen, dessen Daten permanent an einen zweiten Rechner gesendet werden. Durch diese Änderung wäre es möglich, die Daten des Raspberry Pi ohne das zusätzliche Programm WinSCP zu betreiben, da die Bilder und das Temperaturlogfile mit Hilfe eines normalen Browsers heruntergeladen werden könnten.

Um die Steuerung der Kamera benutzerfreundlicher und intuitiver zu gestalten, sollte ein Graphical User Interface (GUI) programmiert werden, zum Beispiel mit der freien Software QT (The QT Foundation, 2015). Mit diesem Programm müssen der Verbindungsaufbau, die Übermittlung der Befehle und die Anzeige der Telemetriedaten der Kamera ermöglicht werden. Gegebenenfalls könnte auch der Download der Bilder, mit der Option auf eine Vorschau derselben, implementiert werden. Auch alle weiteren bisherigen und künftig noch möglichen Funktionen sollten in dem GUI verankert werden, sodass der Nutzer die gesamte Kamera mit einem einzigen Programm steuern kann.

Weitere Programme könnten zum Beispiel die angesprochene Motorsteuerung und die Temperaturregelung sein (siehe 10.1). Die Motorsteuerung müsste die absolute Position des Filtrerrades bestimmen und anhand dieser einen gewünschten Filter einstellen können. Die Temperaturregelung sollte prinzipiell nicht durch den Nutzer verändert werden können, außer um die Abhängigkeit der Kamera von der Temperatur zu untersuchen, weswegen dieses Programm für den Standardnutzer nur im Hintergrund laufen müsste.

Um die Kamera in der bestmöglichen Konfiguration nutzen zu können, sollte ebenfalls ein automatisches Auswerteprogramm für die Bildbearbeitung geschrieben werden, was die Rohdaten aus den Bildern in kalibrierte 10-Bit Bilder umwandelt. Dazu muss auch der Testaufbau standardisiert werden, damit für die Software die Erkennung der Zielregionen vereinfacht wird. Idealerweise sollte das Ergebnis dieses Programms nicht nur die Erzeugung der Bilder sein, sondern zusätzlich sollte automatisch die Emissivität der Probe bestimmt und diese dargestellt werden. Das Programm könnte in einem letzten Schritt, durch Verwendung aller Filterkanäle, auch die Emissivitätskurve über den verschiedenen Wellenlängen zeichnen und so eine direkte Auswertung der Ergebnisse ermöglichen.

10.3 Optimierungspotenzial des Testaufbaus

Der Testaufbau hat ebenfalls sehr viel Verbesserungspotential, da die Verwendung einer abbildenden IR-Kamera auf der PEL bisher noch nicht stattgefunden hatte und somit das Testequipment nun auf die neuen Anforderungen einer solchen Kamera angepasst werden muss. Es waren weiterhin noch keine Erfahrungen für den optimalen Aufbau der Testkonfiguration vorhanden, was zu Problemen während der Tests geführt hat (siehe Kapitel 9). Die Optimierung des Testaufbaus sollte zu besseren Ergebnissen führen und die in Kapitel 10.2 angesprochene Auswertesoftware ermöglichen.

Als mögliche Modifikationen sind die Abdeckung der Probentasse oder die Verwendung einer Lochblende vor dem Kameraobjektiv zu nennen, durch die jeweils nur die in der Tasse befindliche Probe sichtbar sein soll. Allerdings hatte die verwendete Lochblende während der Tests zu Beugungseffekten geführt (siehe Kapitel 8), was eher für eine Modifikation der Tasse in der Kammer spricht. Die bestmögliche Modifikation der Tasse wäre der Wechsel von einer Stahltasse hin zu einem induktiven Material, das einerseits zwar die aufgenommene Wärme gut an das Probenmaterial abgibt, dabei jedoch selbst eine sehr geringe Emissivität und auch

Reflektanz im infraroten Bereich besitzt. Da ein solches Material schwer zu finden ist, wäre es alternativ möglich, den äußeren Tassenrand von 2 mm auf 0,5 mm zu verringern, sodass das Gebiet, das die Probe überstrahlt, weiter verringert wird. Eine Vergrößerung der Tasse an sich würde zusätzlich die interessanten Regionen der Probe vergrößern und die Gebiete des Überstrahlens weiter an den Rand drängen.

Auch die Anschaffung von einer für visuelle Wellenlängen geeigneten Linse, die als Verschluss der PEL-Kammer dient und durch die die Probe in der PEL beobachtet wird, wäre eine Verbesserung, da die Justierung der Kamera auf der PEL im optischen Bereich ermöglicht wird.

Um die Temperaturproblematik zwischen PEL und Kamera während der Tests, wie in Kapitel 9 beschrieben, zu umgehen, muss das bisherige passive Konzept des Testaufbaus geändert werden. Da sich die PEL-Kammer sehr stark erwärmt, kann die Kühlung der Kamera nicht wie geplant über die Struktur erfolgen. Um dieses Konzept nicht komplett verwerfen zu müssen, wäre es möglich, die PEL-Halterung durch eine Halterung zu ersetzen, die direkt mit dem Tisch verbunden ist, auf dem die PEL-Kammer steht. Der Tisch eignet sich sehr gut für diese Aufgabe, da dieser bereits über geeignete Bohrungen verfügt, von der Temperatur der PEL kaum beeinflusst wird und mit 19 Grad Celsius relativ konstant warm ist. Durch eine solche Halterung der Kamera, welche zusätzlich als Kühlfinger dient, sollte die Temperatur der Kammer deutlich weniger auf die Kamera übertragen werden. Allerdings müssen die Anschraubpunkte in der Bodenplatte angepasst und das Dichtungskonzept zwischen Kammer und Kamera überprüft werden.

11 Fazit

Die vorliegende Masterarbeit hatte als Hauptaufgabe, aus dem geplanten Optikkonzept des Projektes VEM ein Entwicklungsmodell dieser Infrarotkamera zu designen, diese zu bauen und abschließend zu testen. Anhand dieser Tests sollte dann verifiziert werden, ob das geplante Konzept zu einem Erfolg bei der Detektion unterschiedlicher Emissivitäten von analogen Venusproben führen kann.

Diese Hauptaufgabe ist erfolgreich durchgeführt worden, wie man an den Ergebnissen in Kapitel 9.2 erkennen kann. Das Entwicklungsmodell wurde vollständig aufgebaut und in mehreren

Testkampagnen verwendet, um Emissivitätsmessungen durchzuführen. Dabei sind zahlreiche Bildaufnahmen entstanden, deren gute Qualität eine wissenschaftliche Auswertung erlaubte. Neben einigen Optimierungsvorschlägen, die sich während der Nutzung der Kamera herausgestellt haben und die zukünftig die Ergebnisse dieser Masterarbeit noch weiter verbessern können, können die Umsetzung der Hauptaufgabe dieser Masterarbeit als abgeschlossen betrachtet und die Neuentwicklung dieser IR-Kamera als ein Erfolg bezeichnet werden. Der Bau des Entwicklungsmodells hat für die Gesamtentwicklung von VEM einen wichtigen Schritt bedeutet, da neben ersten Erfahrungen mit der Kamera und dem Kameraprinzip auch viele konstruktive und messtechnische Erfahrungswerte für weiterführende Modelle mit kostenintensiveren Komponenten gesammelt werden konnten.

Die Vergleichbarkeit mit VEM ist, bis auf die verwendeten Kaufteile und das daraus resultierende eigene Strukturdesign der IR-Kamera, definitiv gegeben, da das Optikkonzept direkt von VEM für das Entwicklungsmodell übernommen wurde und als funktionell nachgewiesen werden konnte. Die in Kapitel 3.3 definierten Anforderungen an das Entwicklungsmodell konnten alle eingehalten bzw. erfüllt werden, was ebenfalls für die Vergleichbarkeit des Modells mit der VEM Kamera spricht. Aufgrund der während der Masterarbeit gesammelten Erfahrungen kann jedoch auch die Notwendigkeit eines echten Qualifikationsmusters bestätigt werden, da nur an einem, dem Flugmuster identischen, Modell alle kritische Stellen des Designs entdeckt werden können.

Da mit dem Bau eines Entwicklungsmodells die hohen Kosten eines Qualifikationsmodells umgangen werden sollen, war eine weitere Anforderung an diese Masterarbeit, die Kosten für das Entwicklungsmodell so stark wie möglich zu reduzieren. Auch dies ist gelungen, da sich die Kosten für die Kamerahardware (ohne Gehäuse) insgesamt auf weniger als 2000 Euro belaufen haben.

Die Kosten konnten insbesondere durch die Verwendung des Raspberry Pi und dem Kamera Modul gesenkt werden, da die Entwicklungskosten für eine neue Elektronik und eine zugehörige IR-Kamera entfallen sind. Durch deren Verwendung kann auch die Fragestellung, ob es mit einer kommerziellen Elektronik und Kamera möglich ist, wissenschaftlich verwertbare Daten zu gewinnen, als beantwortet angesehen werden. Da die Einsatzmöglichkeiten von Einplatinencomputern so vielfältig sind, sollte es prinzipiell möglich sein, neben den hier

durchgeführten Programmierarbeiten zur Kommunikation und dem Datenaustausch fast jede Aufgabenstellung mit ihnen zu lösen. Eine Verwendung dieser Einplatinencomputer im Feinvakuum konnte im Rahmen dieser Arbeit bereits nachgewiesen werden. Um eine volle Qualifikation für den Weltraum zu erhalten, müssen jedoch noch einige weitere Tests erfolgen, die in Kapitel 4.1 erläutert wurden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sowohl die Erstellung des Entwicklungsmodells der VEM Kamera und deren Test an analogen Venusproben zur Verifikation der Arbeitsweise von VEM als auch die Eignung des Raspberry Pi Einplatinencomputers für zukünftige Nanosatelliten erfolgreich abgeschlossen und nachgewiesen werden konnten.

Quellenverzeichnis

- Adams, J. (2014). *Raspberry Pi Foundation*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Forum: <http://www.raspberrypi.org/forums/viewtopic.php?f=98&t=74908>
- Arduino. (2015). *Arduino*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von <http://www.arduino.cc/>
- Brieß, K. (2015). Detektoren. In *VL Weltraumsensorik - UV- und optische Sensorik II: optische Systeme, Filter und Detektoren* (S. 68ff.). TU Berlin.
- Brieß, K. (2015). Grenzen der örtlichen Auflösung. In *VL Weltraumsensorik - UV- und optische Sensorik I: Kamera-Abtastkonzepte und Kenngrößen* (S. 27). TU Berlin.
- CubieBoard. (2015). *CubieBoard*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von A series of open source hardware: <http://cubieboard.org/>
- D'Amore, M. (2015). *Pythonprogramm für Bildauswertungen*. DLR Berlin-Adlershof.
- Dassault Systemes. (2015). *CATIA V5 R21*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Dassault Systemes: <http://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/>
- Dörr, M. (2011). Klassifikation von Vakuum. In *VL Vakuumphysik und -technik* (S. 6). TU Dresden.
- Edmund Optics. (2015a). *30mm NIR Achromat Pair (35/60)*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Edmund Optics: <http://www.edmundoptics.de/optics/optical-lenses/achromatic-lenses/mounted-near-ir-nir-achromatic-lens-pairs/47295/>
- Edmund Optics. (2015b). *30mm NIR Achromat Pair (35/75)*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Edmund Optics: <http://www.edmundoptics.de/optics/optical-lenses/achromatic-lenses/mounted-near-ir-nir-achromatic-lens-pairs/47296/>
- Edmund Optics. (2015c). *850nm Bandpassfilter*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Edmund Optics: <http://www.edmundoptics.de/optics/optical-filters/bandpass-filters/hard-coated-od4-10nm-bandpass-filters/86087/>
- Edmund Optics. (2015d). *905nm Bandpassfilter*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Edmund Optics: <http://www.edmundoptics.de/optics/optical-filters/bandpass-filters/hard-coated-od4-10nm-bandpass-filters/65123/>
- Edmund Optics. (2015e). *1000nm Bandpassfilter*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Edmund Optics: <http://www.edmundoptics.de/optics/optical-filters/bandpass-filters/infrared-bandpass-interference-filters/64296/>
- European Cooperation for Space Standardization. (2007). *ECSS-M-30B - Space project management: Project planning and implementation*. ESTEC - Noordwijk: ESA.
- GIMP. (2015). *GIMP - GNU Image Manipulation Program*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von <http://www.gimp.org/>

- Goyo Optical Inc. (2015). *GM12HR31814MCN-1*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von GOYO Optical Inc.: <http://www.gyooptical.com/products/industrial/GM12HR31814MCN-1.pdf>
- Helbert, J. (Januar 2015). *Aufgabenstellung Masterarbeit*. DLR Berlin-Adlershof.
- Helbert, J. (Mai 2015). Informationen zu VEM. (D. Wendler, Interviewer)
- Henderson, G. (2015). *Wiring Pi - GPIO Interface library for the Raspberry Pi*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von <http://wiringpi.com/>
- IBE Optics. (2015). *Telecentric Lenses*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von IBE Optics: http://www.ibe-optics.com/Telecentric_lenses
- Maturilli et al, A. (2014). Komatiites as Mercury surface analogues: Spectral measurements at PEL. *Earth and Planetary Science Letters* 398, S. 58-65.
- Maxim Integrated. (2015a). *Thermal Management Handbook*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Maxim Integrated: <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN4679.pdf>
- Maxim Integrated. (2015b). *DS18B20+*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Maxim Integrated: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- Naderi et al, F. (18. Februar 2015). Discovery 2014. *VERITAS - Venus Emissivity, Radio Science, INSAR, Topography, and Spectroscopy*. USA.
- OmniVision Technologies Inc. (2015). *OV5647*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von OmniVision Technologies Inc.: <http://www.ovt.com/uploads/parts/OV5647.pdf>
- PuTTY. (2015). *PuTTY - SSH and telnet client*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von <http://www.putty.org/>
- Raspberry Pi Foundation. (2015). *Raspberry Pi Documentation*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Raspberry Pi Foundation: <https://www.raspberrypi.org/documentation/>
- Reess, J. M. (16. 07 2014). *VEM Optical Design and SNR calculation*. Lesia, Frankreich.
- Riedl, M. J. (2002). Wiensches Verschiebungsgesetz. In M. J. Riedl, *Optische Grundlagen für Infrarotsysteme* (S. 7-8). Bellingham, Washington: SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Schneider Kreuznach. (2015). *KMP APO-XENOPLAN 20 Telezentrik*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Schneider Kreuznach: <http://www.schneiderkreuznach.com/industrial-solutions/objektive-und-zubehoer/produkte/13-oe22mm-objektive/48-mp-anti-shading-objektive/apo-xenoplan-2020/>
- SingeltonMillerWiki. (22. Juni 2013). *Camera Module Lens Modification*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von WikiRaspberryTorte: http://wiki.raspberrytorte.com/index.php?title=Camera_Module_Lens_Modifcation

- Stieglitz, R., & Heinzl, V. (2012). Auswirkungen des Energiebedarfs. In R. Stieglitz, & V. Heinzl, *Thermische Solarenergie: Grundlagen, Technologie, Anwendungen* (S. 3ff.). Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- The QT Foundation. (2015). *QT - The leading independent technology for cross-platform development*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von <http://www.qt.io/>
- Thorlabs. (2015). *MAP1050100-B – 1:2 Matched Achr. Pair*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von Thorlabs: <https://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=MAP1050100-B>
- WinSCP. (2015). *WinSCP - Free SFTP, SCP and FTP client for Windows*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von <http://winscp.net/eng/docs/lang:de>
- Wolfe, W. L. (1998). Sources. In W. L. Wolfe, *Introduction to Radiometry* (S. 47ff.). Bellingham, Washington: SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Wolfe, W. L. (1998). Transmission, Reflection, Emission and Absorption. In W. L. Wolfe, *Introduction to Radiometry* (S. 29). Bellingham, Washington: SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Zemax LLC. (2015). *Zemax*. Abgerufen am 21. Mai 2015 von <http://www.zemax.com/>

Anhang

Tabelle A: Zusätzliche Befehle zur Kamerasteuerung

Aufnahme von Einzelbildern		
Belichtungsdauer definieren und Befehl in Kommandozeile einfügen	raspistill --timeout 1 -ss [Belichtungsdauer] -bm -ISO 800 --awb off -awbg 1,1 --drc off --hflip -- vflip --raw --settings --nopreview --encoding png --output /home/pi/Pictures/\$(date +'%d.%m.%Y-%H.%M.%S').png	
Aufnahme von Serienbildern mit bestimmter Belichtungsdauer:		
Belichtungsdauer definieren und Befehl in Kommandozeile einfügen	raspistill -tl 1000 -t 180000 -ss [Belichtungsdauer] -bm -ISO 800 --awb off - awbg 1,1 --drc off --hflip --vflip --raw --settings --nopreview --encoding png -o /home/pi/Pictures/%03d.png;	Abbruch des Befehls nach der Aufnahme der gewünschten Anzahl der Bilder
Videostream auf einen Windowsrechner:		
Start des Streams auf Kameraseite:	raspivid -t 0 -o - nc [IP des Rechners] 5001	Beenden des Streams durch Abbruch des Streams auf Kameraseite
Start der Anzeige auf Windowsseite (Eingabe in cmd.exe):	"Pfad zur ncat.exe" -l -p 5001 "Pfad zur mplayer.exe" -fps 31 -cache 1024 – (benötigt die Programme Netcat und MPlayer für Windows)	

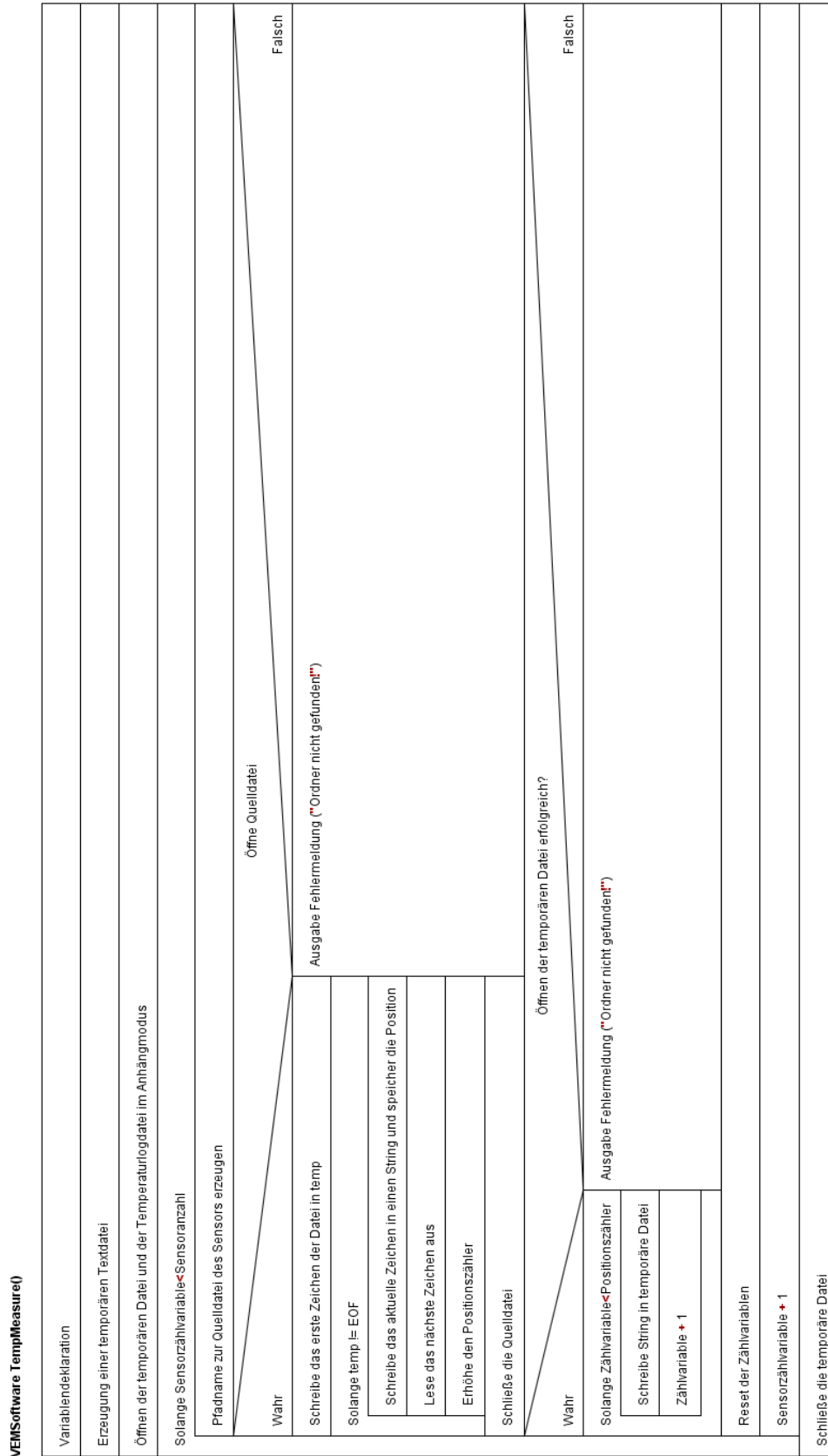


Abbildung A: Struktogramm VEMSoftware (Teil 1)

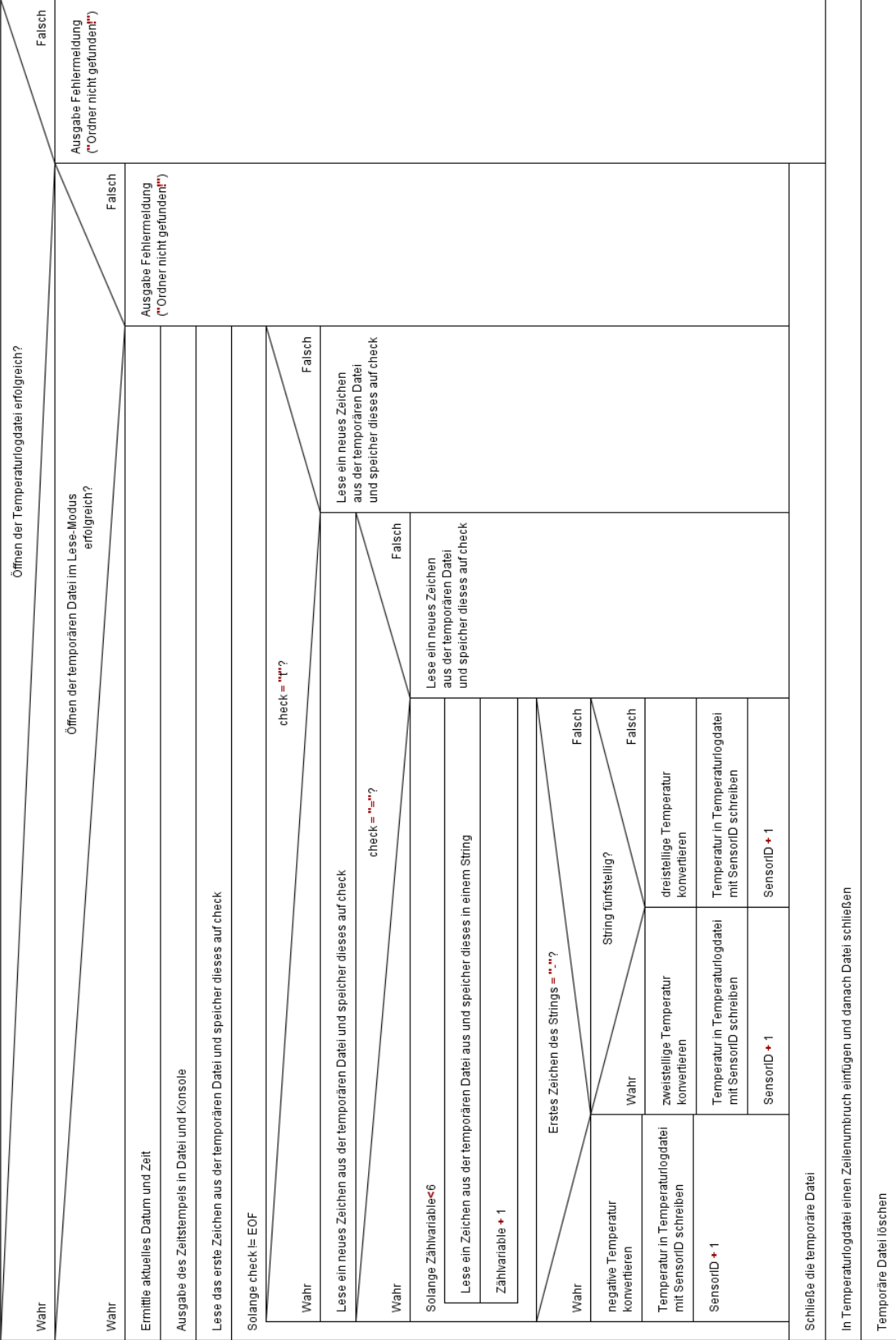


Abbildung B: Struktogramm VEMSoftware (Teil 2)

VEMPicture

Systemaufruf Fotoroutine 6 Sekunden
Systemaufruf Fotoroutine 5 Sekunden
Systemaufruf Fotoroutine 2 Sekunden
Systemaufruf Fotoroutine 1,5 Sekunden
Systemaufruf Fotoroutine 1/2 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/4 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/8 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/16 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/32 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/64 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/128 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/256 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/512 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/1024 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/2048 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/4096 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/8192 Sekunde
Systemaufruf Fotoroutine 1/16384 Sekunde

Abbildung C: Struktogramm VEMPicture